INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

¿POR QUÉ ESTAMOS SOLOS? | EL EXPERIMENTO DE LA TRIPLE RENDIJA | FAGOTERAPIA

MARZO 2020 N.º 522

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Marzo 2020 • N.º 522 • 6,90 € • investigacionyciencia.es

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

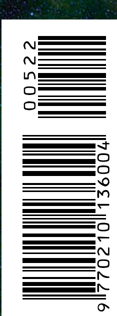
¿Por qué estamos solos?

Nuevas simulaciones de la Vía Láctea sugieren que no hemos coincidido con otras civilizaciones porque nos hallamos fuera de sus rutas de exploración

FÍSICA
Superposición cuántica en una triple rendija

EVOLUCIÓN
¿Por qué necesita el cerebro que hagamos ejercicio?

MEDICINA
Nuevos tratamientos contra las bacterias multirresistentes



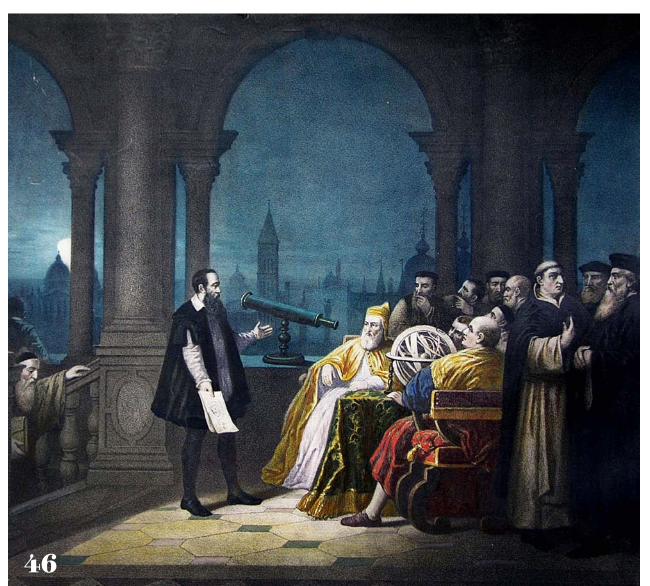
INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
Marzo 2020, Número 522



JUSTIN SCHUETZ

ARTÍCULOS







INVESTIGACIÓN Y
CIENCIA

SECCIONES

EN PORTADA

Hace 70 años que los astrónomos intentan encontrar una solución a la llamada «paradoja de Fermi»: si la vida inteligente es común en el universo, ¿por qué no hemos detectado indicios de civilizaciones extraterrestres? Tras décadas de propuestas dispares, las simulaciones informáticas de la Vía Láctea han sugerido una nueva solución. Al igual que una isla remota del Pacífico, nuestro planeta bien podría haberse quedado apartado de la actividad colonizadora de otras especies.



redaccion@investigacionyciencia.es



Diciembre 2019

CONSTANTES ELEMENTALES

El artículo de Bartolo Luque «La función de Lambert» [Investigación y Ciencia, diciembre de 2019] concluye con una comparación entre cierta constante llamada Ω, presentada a partir de la función *W* de Lambert, y los números π y *e*.

Desconozco si Ω tiene una definición independiente y «anterior» a la dada por el valor *W*(1). Sin embargo, de los números π y *e* sí puede decirse que su definición precede a la de las funciones trigonométricas y logarítmicas, respectivamente. Por tanto, sí parece haber una diferencia entre Ω y los números π y *e* (con independencia de que la función *W* de Lambert se considere elemental o no).

Ubaldo Usunáriz
Madrid

Responde Luque: *Mi intención al escribir la columna, además de presentar la función W de Lambert y esbozar algunas de sus aplicaciones, era hacer pensar al lector en qué hace que una función se considere elemental. Probablemente, ¡la mayoría de nosotros ni siquiera nos lo habíamos planteado nunca! Me alegra por tanto el comentario del lector, pues apunta a una posible crítica a la candidatura de W a función elemental.*

Coincido en que el número π es anterior a las funciones trigonométricas. Sin embargo, el número e es hijo del análisis. El primero que lo definió sin género de dudas fue Jacob Bernoulli en 1683 (como el conocido límite que surge al tratar el interés compuesto). Todas las insinuaciones anteriores a su existencia, como las de John Neper en sus trabajos sobre logaritmos (de 1618), son del siglo xvii, *por lo que esta constante matemática es contemporánea o posterior a la función logaritmo. De la constante Ω podemos decir algo parecido.*

Podríamos contestar que, mientras que el número e aparece hasta en la sopa, probablemente la mayor parte de los lectores hayan visto Ω por primera vez en esta columna. Pero en los tiempos de Neper y los Bernoulli la situación con el número e debió de ser similar, ¿no?

ENERGÍA Y ESPACIOTIEMPO

El artículo «Una nueva explicación para la energía oscura», de Daniel Sudarsky [Investigación y Ciencia, febrero de 2020], expone que un espaciotiempo granular explicaría la existencia de la energía del vacío a partir de la pérdida de la energía de movimiento de la materia debido a su interacción con las «rugosidades» del espaciotiempo. Sin embargo, si se considera el universo como un sistema formado por la materia y el vacío, ¿no es esta una explicación basada en el principio de conservación de la energía, contrariamente a lo que se indica en el artículo?

Enric Ruiz Morillas
Vallmoll, Tarragona

Responde Sudarsky: *La pregunta es muy razonable y toca un aspecto delicado. Que una bolita se detenga tras rodar sobre el piso nos lleva a pensar que la energía de su movimiento no se perdió, sino que se transfirió al suelo en forma de calor. Sin embargo, en un caso como este hay que notar dos puntos. Primero, que después del paso de la bolita, el estado del piso ha cambiado, de modo que se puede decir que ahora posee mayor energía (sus átomos vibran con mayor intensidad y el suelo está, efectivamente, más caliente). Segundo, que para poder mantener lo anterior, los átomos del piso deben perdurar en el tiempo; es decir, deben ser «los mismos átomos» que antes, solo que ahora en un nuevo estado (en este caso, de vibración).*

En el caso del espaciotiempo (y nótese que no se trata solo del espacio, ya que según la teoría de la relatividad espacio y tiempo deben tratarse como un todo unificado), el asunto se torna más problemático. Según el enfoque descrito en el artículo, los grados de libertad relevantes no cambiarían de la manera adecuada para poder afirmar que la energía perdida «reside ahora en el espaciotiempo». Al tratarse de grados de libertad espaciotemporales, no parece natural, en vista de las ideas relativistas, considerarlos como entes que preservan su existencia en el tiempo. Los entes que causaron la pérdida de energía de la partícula simplemente ya no existirían en otro tiempo, de modo que no podrían «llevar consigo» esa energía.

Debo reconocer que algunos de mis colegas adoptan un punto de vista más cercano al del lector, con el que yo sin embargo discrepo. Mi opinión se sustenta en un marco que cuestiona la noción de energía como un ente constitutivo básico que, en línea con las ideas de ciertos filósofos griegos, «ni se crea ni se destruye, solo se transforma». Al respecto, puede consultarse el artículo «On the status of conservation laws in physics: Implications for semiclassical gravity» (Tim Maudlin, Elías Okon y Daniel Sudarsky en Studies in History and Philosophy of Modern Physics, *en prensa; disponible en arxiv.org/abs/1910.06473).*

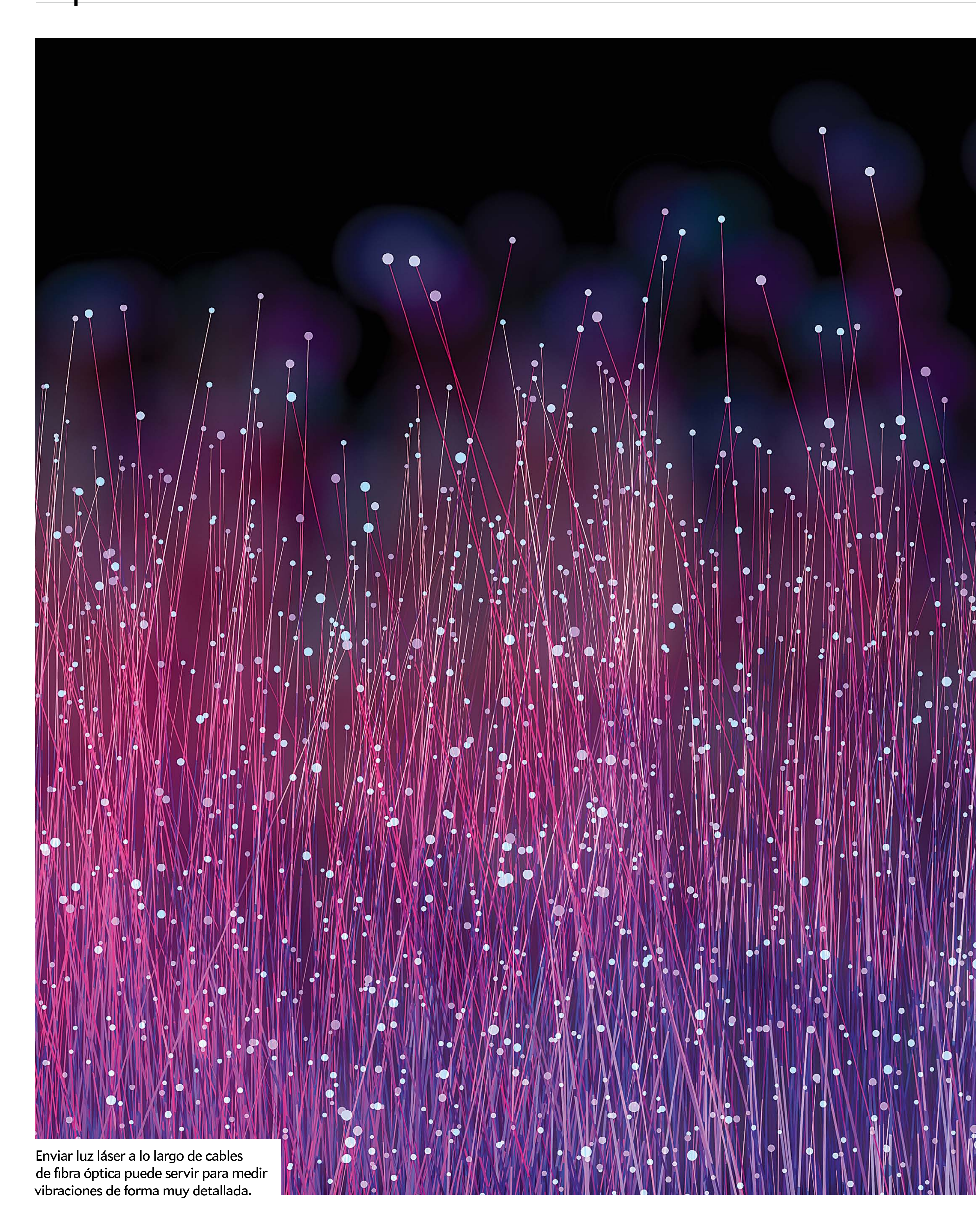


Febrero 2020

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:
PRENSA CIENTÍFICA, S. A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.



Enviar luz láser a lo largo de cables de fibra óptica puede servir para medir vibraciones de forma muy detallada.



GETTY IMAGES

SISMOLOGÍA

Detectores de fibra oscura

Los cables de fibra óptica dispuestos bajo las ciudades, sobre los glaciares y a lo largo del fondo marino podrían captar las vibraciones sísmicas

Celeste Labedz escuchó un sonido similar a un trueno que atravesaba la masa de hielo. Se encontraba sobre el glaciar Taku, en Alaska, una vasta extensión de hielo cubierta de nieve y flanqueada por imponentes montañas, cuando se produjo el «terremoto glacial»: un efímero temblor sísmico causado por el movimiento repentino del glaciar. Enseguida buscó su libreta y anotó la hora. Más tarde Labedz, estudiante de doctorado en el Instituto de Tecnología de California, cotejaría esa hora con los datos de un cable de fibra óptica que acababa de instalar junto a sus colaboradores para estudiar ese tipo de seísmos. Se trata de un método nuevo y prometedor que está revolucionando la geología y otras disciplinas afines.

La información se transmite a través de un cable de fibra óptica mediante pulsos de luz láser. La mayoría de la luz avanza a través de los finísimos hilos de vidrio, pero es inevitable que una pequeña fracción tropiece con defectos microscópicos del cable y regrese en dirección a la fuente. Esta reflexión varía cuando el cable se estira o se curva en respuesta a vibraciones del suelo, como las causadas por un terremoto o el paso de un camión. Así, observando cambios en la luz retrodispersada, los científicos pueden cuantificar los temblores. Desarrollada hace un década por la industria del petróleo, esta técnica, conocida como detección acústica distribuida (DAS), se ha introducido hace poco en la ciencia. «La comunidad [que investiga en DAS] ha crecido rápidamente en el último par de años», afirma Jonathan Ajo-Franklin, geofísico de la Universidad Rice, en Houston. El pasado diciembre, una conferencia organizada por la Unión Geofísica Americana reunió a científicos que habían empleado esta técnica para estudiar glaciares, seguir la evolución de tormentas eléctricas y asomarse a las profundidades oceánicas.

Una de las principales ventajas de la DAS es que los cables de fibra óptica pueden extenderse a lo largo de muchos kilómetros, y uno solo de ellos puede actuar como una red de miles de sensores que cubren cada metro de su recorrido. Por el contrario, los sismómetros convencionales registran los movimientos del suelo en un único punto, lo que constituye un obstáculo importante a la hora de caracterizar el interior de la Tierra. Por ejemplo, cuando el monte Santa Elena comenzó a retumbar antes de su catastrófica erupción de 1980, el hecho de que solo hubiera un sismómetro en las inmediaciones impidió a los científicos determinar si las sacudidas respondían realmente al despertar del volcán. «Podemos pensar en ello en términos de farolas», explica Nathaniel Lindsey, geofísico que actualmente trabaja en la Universidad Stanford. «Si solo disponemos de unas pocas farolas para iluminar todo el volcán, no funcionará demasiado bien.»

Una segunda ventaja es que los cables de fibra óptica ya atraviesan el planeta. Aunque en algunos lugares, como el glaciar Taku, todavía hay que instalarlos, en otros (como algunas ciudades o puntos del fondo marino) ya existen cables que no se usan o que pueden adaptarse para la DAS. Mucha de esa disponibilidad se debe a la burbuja de las *puntocom* en la década de los noventa, cuando las compañías de telecomunicaciones desplegaron una extensa red de cables; algunos de ellos, conocidos colectivamente como fibra oscura, no están siendo explotados. Los científicos no tienen más que conectar uno de sus extremos a una unidad «interrogadora», que emite pulsos láser hacia el otro extremo y registra la retrodispersión, y ya tendrán lista una nueva red de detección de ondas sísmicas.

El año pasado, Tieyuan Zhu, geofísico de la Universidad Estatal de Pensilvania, adaptó algunos cables de fibra sin usar de la red universitaria para buscar leves vibraciones bajo el campus. Le sorprendió hallar múltiples ruidos en sus datos durante una tormenta eléctrica nocturna. Aunque los científicos saben desde hace tiempo que las vibraciones del aire producidas por estruendos pueden inducir temblores en la superficie terrestre, no estaba claro que la nueva técnica fuera capaz de detectarlos. Pero cuando Zhu sincronizó sus resultados con los datos de la NASA, no hubo lugar a dudas. «Creo que esta tecnología tiene un gran potencial para "iluminar" las áreas urbanas», sostiene el científico. «Y no solo en cuanto al estudio de terremotos, sino también de riesgos geológicos [como deslizamientos y tsunamis] y fenómenos meteorológicos.»

Otros investigadores apuntan más lejos. En un trabajo publicado el pasado noviembre en *Science*, Lindsey, Ajo-Franklin y Craig Dawe, del Instituto de Investigación del Acuario de la Bahía de Monterrey, conectaron una unidad interrogadora a un cable de fibra óptica de 20 kilómetros que normalmente se emplea para transmitir los datos de los instrumentos científicos instalados en el fondo marino de la bahía de Monterrey, en California. El sistema se encontraba fuera de servicio por mantenimiento, lo que brindó a los científicos la oportunidad de buscar vibraciones. En solo cuatro días cartografiaron múltiples zonas de fallas submarinas y caracterizaron los temblores del fondo marino causados por el oleaje superficial. Unos mapas más detallados del fondo marino permitirían a los científicos predecir mejor los terremotos y las erupciones submarinas, fenómenos que pueden originar tsunamis potencialmente mortales.

Respecto a su aplicación en glaciares, Labedz y sus colaboradores han convertido un único cable en 3000 detectores sísmicos. Los primeros resultados muestran un período de cinco horas con 100 terremotos glaciales, muchos de ellos probablemente originados por el agua de deshielo al abrir grietas en el glaciar. Zhongwen Zhan, sismólogo del Instituto de Tecnología de California y director de tesis de Labedz, espera colocar algún día cables de fibra óptica permanentes en Groenlandia o en la Antártida, a fin de entender mejor cómo contribuye la fusión de los glaciares causada por el cambio climático a la subida del nivel del mar.

Pero Zhan tiene un sueño aún más ambicioso: implementar el equivalente a un millón de sensores en California empleando unos 1000 kilómetros de fibra oscura. Ya ha transformado 37 kilómetros

NEUROCIENCIA

Mejorar la audición con ruido de fondo

El ruido blanco ayudaría a quien lo escucha a distinguir sonidos similares



El procesamiento auditivo suele analizarse en entornos silenciosos y artificiales, pero en condiciones reales normalmente viene acompañado de un trasfondo sonoro, como el repiqueteo de los teclados, los murmullos de voces o la bocina de algún automóvil. Hace poco que los expertos se han lanzado a estudiar ese procesamiento en presencia de sonido ambiental, concretamente del monótono ruido blanco, similar al de la «nieve» de los viejos televisores analógicos.

Tania Rinaldi Barkat, neurocientífica en la Universidad de Basilea y una de las autoras del estudio, publicado el noviembre pasado en *Cell Reports*, opina que la conclusión parece ilógica: el fondo de ruido blanco, lejos de afectar a la audición, facilita que los ratones diferencien los tonos parecidos.

Es fácil reconocer las notas situadas en los extremos del teclado de un piano, pero si se tocan dos teclas contiguas, hasta el oído más fino puede tener problemas para distinguirlas. La razón es el modo en que la vía auditiva procesa los sonidos más simples, llamados tonos de frecuencia puros: las neuronas próximas entre sí responden a tonos similares, pero cada una responde mejor a una frecuencia concreta. El grado en que cada neurona responde a una frecuencia dada se denomina curva de sintonización.

Los investigadores han descubierto que reproducir el ruido blanco estrecha las curvas de sintonización de frecuencia de las neuronas en el cerebro del ratón. «En palabras sencillas: el ruido blanco de fondo que se emite continuamente con una intensidad sonora fija disminuye la respuesta de las neuronas a un tono reproducido por encima de ese ruido», explica Barkat. Y al reducir el número de neuronas que responden simultáneamente a la misma frecuencia, el cerebro discrimina mejor entre los sonidos similares.

A fin de averiguar si los ratones diferencian los tonos, recurrieron a un test de conducta en que los roedores han de reaccionar a una frecuencia específica. A semejanza los humanos, reconocen sin dificultad tonos muy distintos y tienen problemas con los similares, pero cuando se añadió el ruido blanco, supieron reconocer mejor estos últimos. Indagaron más midiendo la actividad neu-

THOMAS FUCHS

en una red de vigilancia sísmica permanente bajo Pasadena y pretende hacer lo propio en otras ciudades del estado. Los datos podrían servir para revelar vulnerabilidades en las infraestructuras urbanas y para alertar a la población al iniciarse un terremoto. «Resultará de gran ayuda para preparar a la población», asegura Zhan. De momento, los científicos no son capaces de predecir los terremotos, pero comprender mejor los temblores precursores que en ocasiones conducen a un gran seísmo no puede venirles mal.

«Cualquier nuevo dato sobre el modo exacto en que comienzan y se gestan los terremotos podría representar un punto de inflexión», señala Robert Mellors, sismólogo del Laboratorio Nacional Lawrence en Livermore que no participó en la investigación.

Sin embargo, el volumen de datos también plantea un problema de procesamiento. Un único cable de fibra óptica de un sistema de DAS puede generar 10 teraoctetos diarios; en 100 días se llegaría a un petaocteto, una cifra superior a la que contiene el repositorio internacional que reúne todos los datos sísmicos disponibles en el mundo. Antes de empezar a aprovechar la fibra oscura y a desplegar cables en áreas remotas, los científicos deberán concebir un método para almacenar y compartir cantidades ingentes de información.

—Shannon Hall

---

ral en la corteza auditiva del ratón cuando se emitía el ruido blanco, además de estimular directamente ciertas neuronas para desencadenar el efecto supresor de la curva.

Futuras investigaciones deberán desentrañar los pormenores de este mecanismo, afirma Kishore Kuchibhotla, investigador del cerebro en la Universidad Johns Hopkins, ajeno al estudio. «Se sigue sin saber si guardará relación con la percepción humana y de qué modo», añade.

Es posible que entender este efecto ayude a mejorar algún día la audición de la gente. «Introducir ruido en el oído no servirá de nada para alguien que padezca hipoacusia», matiza Daniel Polley, experto en neurociencia de la audición en la Universidad Harvard, que no ha participado en el estudio. «Pero descubrir cómo puede rebajarse la hiperexcitabilidad en el cerebro de una persona con hipoacusia puede ser útil para reconocer sonidos entre el ruido, así como en otros trastornos relacionados, como los acúfenos o la hiperacusia [hipersensibilidad a los sonidos fuertes].»

—Jillian Kramer

PALEOGEOGRAFÍA

El límite meridional de la última glaciación

Unos arácnidos cavernícolas ayudan a cartografiar hasta dónde se extendió el hielo

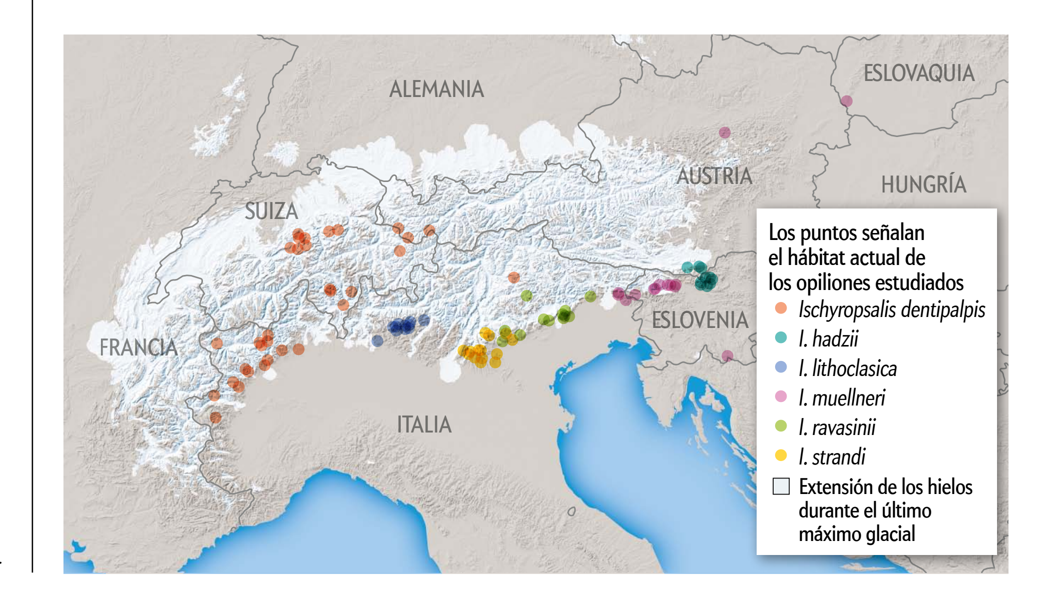
El hogar actual de unos opiliones propios de las cuevas resigue el límite meridional que los glaciares alcanzaron en el auge de la última gran glaciación, hace 22.000 años, apunta una nueva investigación. «Tal vez sea posible reconstruir ese máximo glacial estudiando la distribución de estos arácnidos», explica Stefano Mammola, ecólogo en el Instituto de Hidrología del Consejo Nacional de Investigación italiano y autor principal del trabajo, publicado el pasado agosto en *Journal of Zoological Systematics and Evolutionary Research*.

A los opiliones, vulgarmente llamados segadores, se les confunde a menudo con las arañas. Algunos, armados de grandes pedipalpos prensiles, habitan en grutas húmedas y frías de los Pirineos, los Alpes y los Balcanes, que conforman una estrecha franja que atraviesa Europa de oeste a este. Mammola y sus colaboradores han comparado esa área de distribución con modelos geológicos del casquete helado de la última glaciación y han comprobado que esa franja coincide casi exactamente con el límite sur de los glaciares, con solo ligeras variaciones.

Afirma que los arácnidos seguramente no habrían sobrevivido si el hielo hubiera cubierto sus grutas, pero que tampoco habrían soportado las temperaturas más cálidas al sur del casquete. (Desde entonces, la temperatura ha ascendido en el interior de las cuevas pero, según Mammola, de forma progresiva, por lo que se han podido adaptar.) «Hubo un equilibrio entre las condiciones frías y una gruta que no quedó cubierta en su totalidad», destaca. «Lo que vemos ahora es justamente el trazo de una distribución que fue más extensa en el pasado.»

Mercedes Burns, bióloga en la Universidad de Maryland en Baltimore y especialista en opiliones, cree desde la distancia que tiene sentido que el área de distribución de esos arácnidos siga aún ese antiguo límite. «Es buena idea recurrir a la presencia de esas especies para seguir el rastro de cambios geográficos dilatados en el tiempo, pues debido a su escaso desplazamiento, tanto durante su vida como entre generaciones, son indicadoras de la variación geográfica.» Añade que otros han demostrado que algunas plantas reflejan de modo similar la geografía pretérita. Según Mammola, cartografiar la distribución de especies subterráneas como los opiliones y otros artrópodos puede servir como prueba complementaria para quienes investigan las condiciones paleoclimáticas.

—Joshua Rapp Learn



FUENTE: «TRACKING THE ICE: SUBTERRANEAN HARVESTMEN DISTRIBUTION MATCHES ANCIENT GLACIER MARGINS», STEFANO MAMMOLA ET AL., EN *JOURNAL OF ZOOLOGICAL SYSTEMATICS AND EVOLUTIONARY RESEARCH*, VOL. 57, 17 DE ENERO DE 2019; MAPPING SPECIALISTS


Batata o boniato

BOTÁNICA

Señales de alarma vegetales

Una variedad de boniato alerta a sus vecinas para mantener a raya las plagas

Cuando las hojas de una variedad de batata son mordisqueadas, liberan una sustancia de olor penetrante que incita a las demás hojas, de la misma planta o de otras cercanas, a producir proteínas defensivas que las hacen indigestas. Nuevas investigaciones siguen el rastro a este sistema de alarma oloroso.

«Es un tipo de respuesta rápida», afirma Axel Mithöfer, ecólogo vegetal en el Instituto Max Planck de Ecología Química en Jena, uno de los autores del estudio, que se publicó el pasado noviembre en *Scientific Reports*. Otras plantas poseen sistemas químicos de alarma que avisan a las vecinas de que se preparen para el ataque, pero las hojas no suelen fabricar compuestos defensivos hasta que no son mordidas. En cambio, las hojas de esta planta sintetizan el compuesto en cuanto las vecinas son mordidas.

Para investigar esta respuesta, Mithöfer y sus colaboradores depositaron orugas sobre una variedad de batata resistente a las plagas, la Tainong (TN) 57, y su prima más sensible, la TN66, originarias de Taiwán. Ambas «exhalaron» una cuarentena de sustancias al ser atacadas, pero las hojas de la TN57 liberaron el doble de DMNT, un compuesto hallado en otras respuestas defensivas vegetales.

Como paso siguiente, colocaron en una urna de vidrio cerrada una planta TN57 sana junto a otra a la que se le habían perforado algunas hojas con unas pinzas de laboratorio. A las 24 horas, las hojas intactas de ambas contenían niveles elevados de esporamina. Esta proteína también está presente en los tubérculos de la planta, donde dificulta su digestión en el estómago humano cuando están crudos y causa problemas similares en el intestino de los insectos. Cuando el DMNT sintetizado se liberó en una urna que albergaba plantas sanas, el follaje no tardó en producir la esporamina.

El equipo de Mithöfer estudia ahora el mecanismo del que se sirven las hojas de la TN57 para captar y reconocer el DMNT. También espera analizar si otras sustancias liberadas por el follaje activan las defensas.

César Rodríguez-Saona, entomólogo de la Universidad Rutgers ajeno al estudio, considera fascinante este mecanismo defensivo, aunque matiza que la exposición al DMNT en las urnas cerradas podría ser mayor que la que las plantas experimentan en campo abierto, con el viento. Quizá también las plantas TN57 indemnes no siempre destinen su energía a esta estrategia rápida de defensa.

—*Priyanka Runwal*

MATERIALES

Esculpir con luz

Una nueva técnica para ahuecar cristales diminutos podría ayudar a capturar el carbono atmosférico

Por primera vez, los investigadores han empleado luz para controlar la forma de nanopartículas y crear estructuras huecas micrométricas a partir de cristales de óxido cuproso (cobre y oxígeno). Tales partículas podrían servir para mejorar la obtención de imágenes microscópicas o como catalizadores de bajo coste para retirar el exceso de dióxido de carbono de la atmósfera, según Bryce Sadtler, químico de la Universidad de Washington en San Luis y autor principal de un trabajo sobre la nueva técnica publicado en octubre en la revista *Chemistry of Materials*.

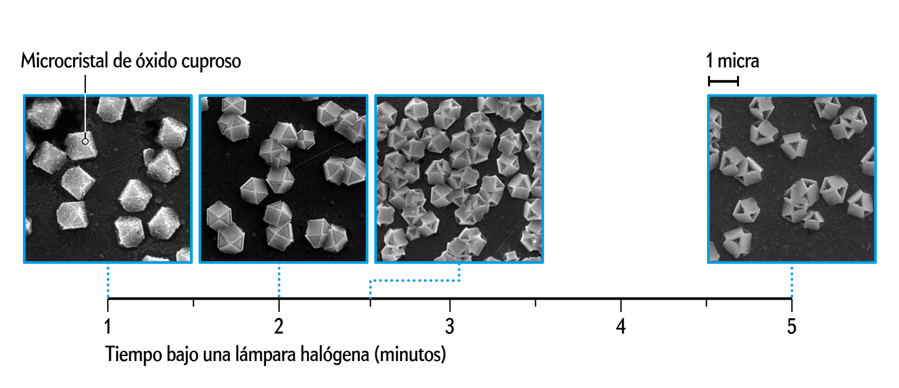
El proceso de vaciado requiere luz visible, una solución alcalina y una fuente de voltaje, explica Sadtler. Al iluminar un microcristal de óxido cuproso, sus electrones se excitan y se unen a los iones de cobre para formar átomos del metal. Esos átomos ya no están ligados al oxígeno y pueden saltar a la superficie de la partícula, formando un recubrimiento de cobre que protege algunas partes del cristal contra los efectos de la solución.

La estructura cristalina determina qué caras quedan protegidas y cuáles se disuelven: la disposición de los átomos en algunas caras permite que los electrones se exciten con más facilidad y atrae más átomos metálicos a la superficie. Pero las caras desprotegidas se disuelven rápidamente, lo que esculpe el cristal a lo largo de líneas geométricas bien definidas. Por razones similares, «solo es posible cortar los diamantes [fácilmente] de un cierto número de maneras», señala Sadtler. Es más sencillo romperlos en la dirección de las filas de átomos de su estructura cristalina.

Stephen Maldonado, químico de la Universidad de Michigan que no participó en el estudio, afirma que los hallazgos «podrían resultar útiles para diseñar catalizadores de alta eficiencia para reducir el CO_2, o en otras áreas».

Sadtler apunta que los cristales ahuecados podrían tener otras aplicaciones, aparte de agilizar las reacciones asociadas a la captura de carbono, gracias a su gran superficie y particular forma. Por ejemplo, los métodos actuales de obtención de imágenes microscópicas funcionan muy bien con los materiales sólidos cristalinos, pero tienen problemas para identificar biomoléculas. De acuerdo con Sadtler, sería posible usar estructuras huecas de este tipo para rodear moléculas orgánicas, tal vez en muestras de sangre u orina, y potenciar la señal de las sustancias difíciles de detectar. Los expertos también estudian otros materiales que interaccionan intensamente con la luz, como los óxidos de hierro y manganeso, compuestos prometedores para el diseño de pilas de combustible de hidrógeno.

—*Leto Sapunar*



PETER CHADWICK, GETTY IMAGES (*boniato*); CHU QIN (*monocristales*)

COMPORTAMIENTO ANIMAL

Transición de fase en una bandada

Un estudio indica que las grajillas en vuelo alternan entre el caos y el orden



Una bandada de grajillas.

GETTY IMAGES

La grajilla (*Corvus monedula*) emplea dos conjuntos de reglas para el vuelo en grupo con resultados distintos, según una nueva investigación. Las bandadas que se dirigen a los dormideros invernales son ordenadas, sea cual sea su tamaño, mientras que las que se congregan para ahuyentar a los depredadores son desorganizadas al inicio en tanto son pequeñas, pero devienen súbitamente ordenadas si alcanzan cierto número de integrantes.

Las bacterias que nadan, las nubes de langostas, los bancos de peces y las bandadas de aves se desplazan como unidades cohesionadas. Este fenómeno aparece cuando se congregan individuos que siguen las mismas reglas, afirma Alex Thornton, que estudia la evolución de la cognición en la Universidad de Exeter. «Solemos pensar en el comportamiento colectivo como si fuera un fenómeno casi físico. Así que la idea de que los animales puedan cambiar las normas que aplican cuando el entorno y lo que están intentando conseguir son distintos resulta novedosa e interesante», afirma. Thornton es uno de los artífices del nuevo trabajo, descrito el noviembre pasado en *Nature Communications*.

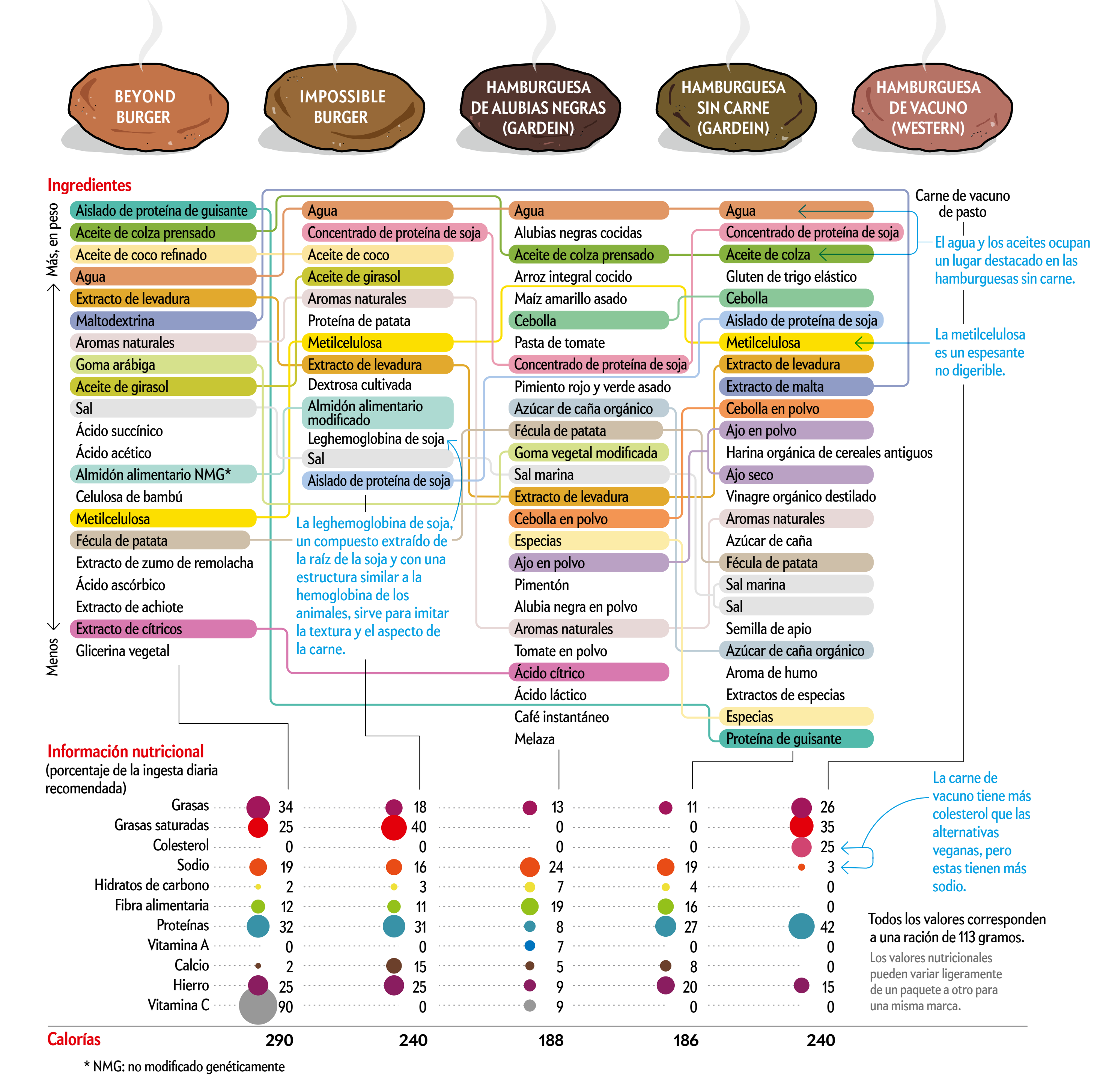
Los autores filmaron el vuelo de grajillas silvestres en Cornualles con cuatro cámaras de alta velocidad sincronizadas, y cartografiaron la posición y la trayectoria de cada individuo.

De las 16 bandadas grabadas, seis eran de paso, pues regresaban a sus dormideros en las tardes de invierno. En esos grupos, fueran grandes o pequeños, cada grajilla variaba su trayectoria tomando como referencia un número fijo de vecinas y manteniendo siempre un orden.

Para provocar la formación de las «bandadas de acoso», mostraron a las aves un zorro disecado que sujetaba un pájaro falso aleteando y reprodujeron los graznidos que suelen lanzar para pedir auxilio contra los enemigos. En esa situación, las grajillas volaron siguiendo a todas las iguales que estaban situadas a una distancia fija. «Con esas normas [el acoso a un depredador], vemos cómo del caos brota el orden. Las bandadas son desorganizadas al principio, cuando son pequeñas, pero si su densidad alcanza cierto nivel, de pronto surge el orden —algo parecido a la licuefacción de un gas», explica. Esas transiciones nunca se habían observado en los pájaros, añade.

«La novedad reside en haber comparado la misma especie en distintos contextos ecológicos, que los investigadores propiciaron mediante una técnica ingeniosa», aclara Shashi Thutupalli, estudioso de la autoorganización de los sistemas vivos en el Centro Nacional de Ciencias Biológicas de la India que no participó en la investigación. Se pregunta si serían los individuos influyentes quienes encabezarían esos cambios de maniobra y si otras especies se comportan de modo parecido.

«Lo que nuestro trabajo pone de manifiesto es que no se puede prescindir del ambiente cuando se intenta modelizar el comportamiento colectivo en los sistemas biológicos», afirma Nicholas Ouellette, físico de la Universidad Stanford y uno de los autores del estudio. Según él, tomando como fuente de inspiración a la grajilla, tal vez los ingenieros usen algún día las respuestas dependientes del contexto para organizar flotas de drones destinadas a tareas de extinción de incendios, vigilancia o búsqueda y rescate: «Nos permite pensar en el diseño de sistemas más flexibles, que puedan modificar las normas para hacer el comportamiento más robusto.» —*Harini Barath*



Las imitaciones de la carne

¿Qué hay en esa hamburguesa que me estoy comiendo?

Las hamburguesas sin carne como la Impossible Burger y la Beyond Burger (que ya se comercializa en España) se están poniendo de moda rápidamente. Pero ¿de qué están hechas? Y ¿cuál es su valor nutricional en comparación con la carne real y sus alternativas clásicas (hamburguesa vegana y de alubias negras)? Este gráfico compara la información consignada en las etiquetas de cinco productos. La Beyond Burger emplea proteína de guisante y la Impossible Burger, de soja y patata; las grasas proceden de diversos aceites. El modo en que los fabricantes obtienen el sabroso gusto umami es un secreto de cocina. Algunos consumidores eligen las versiones sin carne para reducir su ingesta de vacuno por razones personales o ambientales, mientras que a otros simplemente les gustan más las variedades veganas. Pero es discutible si alguna de las opciones es más «saludable» que el resto.

—*Mark Fischetti*

MSJONESNYC



Los antibióticos excretados por el ganado vacuno dificultarían la fijación del carbono por la vegetación.

ECOLOGÍA

Estiércol problemático

El uso de antibióticos en las vacas altera el ciclo del carbono

Desde que los animales de granja comenzaran a recibir antibióticos a mediados de los años 40 del siglo pasado, no ha cesado el debate en torno a la prudencia de esta práctica. Un estudio publicado el pasado diciembre en *Ecology Letters* suma una complicación: los agricultores esparcen estiércol en los campos para aportar carbono y otros nutrientes a los cultivos, pero el estudio muestra que las deposiciones de las vacas lecheras que han recibido dos tipos de antibióticos habituales alteran la composición de las bacterias y de los hongos del suelo. Estos cambios afectaron al modo en que las plantas «fijan» el dióxido de carbono atmosférico transformándolo en materia orgánica, un proceso que forma parte de las estrategias destinadas a mitigar el cambio climático.

Carl Wepking, ahora en la Universidad Estatal de Colorado, dirigió los experimentos como estudiante de grado. Cada mes acarreó sacos llenos de estiércol de vaca hasta un prado de Virginia y esparció 648 gramos por metro cuadrado de tres tipos de estiércol en tres parcelas. Al cabo de varios meses, cubrió las parcelas con cámaras de plexiglás durante siete días y bombeó en ellas dióxido de carbono marcado con un isótopo del carbono para seguir su rastro. Wepking explica que en la parcela de control el estiércol procedente de vacas no tratadas tuvo un efecto positivo extraordinario: las plantas crecieron con vigor reteniendo el carbono recién asimilado a través de la fotosíntesis, al igual que la microbiota del suelo. En cambio, las parcelas abonadas con estiércol de vacuno tratado con antibióticos desprendieron cerca del doble de carbono en forma de dióxido gaseoso. «Que se dé o no un antibiótico a las vacas cambia el modo en que el carbono se distribuye por las plantas. Es inaudito», explica.

El suelo alberga alrededor del doble de carbono que la atmósfera, por lo que cualquier mejora de su capacidad de almacenamiento contribuiría a paliar el cambio climático. Francesca Cotrufo, ecóloga especialista en suelos de la Estatal de Colorado pero ajena al estudio, afirma que los modelos de secuestro del carbono y del clima conceden cada vez mayor importancia al papel que los compuestos vegetales desempeñan en la capacidad de los microbios para almacenar carbono en el suelo. Si bien este estudio del estiércol no contempla el carbono que ya está almacenado, añade, la investigación de los efectos de los antibióticos sobre el carbono recién fijado es un «punto de vista tan novedoso como interesante, que sin duda merece atención».

Wepking sugiere que como dos antibióticos distintos (con modos de acción diferentes) redujeron la eficiencia en la asimilación del carbono, administrar esa clase de fármacos a las vacas podría anular los beneficios que el estiércol tiene para el clima. «Lo que hemos visto hasta ahora es que los efectos del estiércol en el suelo no son tan buenos como creíamos cuando este procede de ganado que ha recibido antibióticos», aunque «todavía resulta difícil afirmar» si dar esa medicación neutraliza o anula cualquier beneficio neto que este abono orgánico pueda tener en la captura de carbono. Pero es esencial averiguarlo, concluye: la cabaña bovina de EE.UU. excreta cada año en el ambiente hasta 13.000 toneladas de antibióticos, una cantidad que se prevé irá en aumento.

—Peter Andrey Smith

GETTY IMAGES (*vacas*), ESTACIÓN DE HIDROBIOLOGÍA, UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE COMPOSTELA (*almeja asiática*)

AGENDA

CONFERENCIAS

5 de marzo
La ciencia reta al envejecimiento
María Blasco, CNIO
Centro Asociado de la UNED
Guadalajara
extension.uned.es

13 de marzo
Marte a través del cine: Realidad y ficción
Jesús Martínez Frías, CSIC
Biblioteca municipal, Astorga
www.ciudadciencia.es

19 de marzo
Futuro vegetal
Stefano Mancuso, Universidad de Florencia
Centro de Cultura Contemporánea de Barcelona
Barcelona
www.cccb.org

26 de marzo
El color emocional de las percepciones
Francisco Mora Teruel, Universidad Complutense de Madrid
La Térmica
Málaga
www.latermicamalaga.com

EXPOSICIONES

Hasta el 29 de marzo
¡Cuidado! Invasoras acuáticas
Museo Nacional de Ciencias Naturales
Madrid
www.mncn.csic.es



OTROS

24 de marzo – Proyección
The sun - Inferno in the sky
Documental científico
Museo de Ciencias Universidad de Navarra, Pamplona
www.unav.edu/web/museo-de-ciencias

Hasta el 27 de marzo
Concurso de radionovelas matemáticas
Para alumnos de primaria y secundaria de centros educativos de Aragón
Convoca: Sociedad Aragonesa de Profesores de Matemáticas
Gobierno de Aragón
conexionmatematica.catedu.es

CLIMA

El peor escenario climático posible no es el más probable

El futuro del planeta ya es crítico. Exagerar las consecuencias del calentamiento global puede hacer que su mitigación parezca más difícil de lo que es

ZEKE HAUSFATHER Y GLEN P. PETERS



EL ABARATAMIENTO y la consecuente proliferación de las energías solar y eólica ha contribuido a moderar las emisiones de carbono, una tendencia que no parece que vaya a revertirse en el futuro.

GETTY IMAGES/MIMADEO/ISTOCK

Hace más de una década, los climatólogos y los expertos en modelos energéticos tomaron una decisión sobre la manera de describir el efecto de las emisiones de gases de efecto invernadero en el clima futuro de la Tierra. Hoy, esa elección ha dado lugar a consecuencias imprevistas que están suscitando un acalorado debate. Creemos que el momento actual, previo a la finalización del Sexto Informe de Evaluación (AR6, por sus siglas en inglés) del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), ofrece una buena ocasión para volver a poner las cosas en su sitio.

Durante la preparación del Quinto Informe de Evaluación (AR5) del IPCC, publicado en 2014, se desarrollaron cuatro escenarios para describir cómo podrían ser las emisiones y el calentamiento planetario hasta 2100. Los distintos casos fueron bautizados con un nombre llamativo: Trayectorias de Concentración Representativas (RCP, por sus siglas en inglés). Uno de ellos, denominado RCP2,6, describe un mundo en el que el calentamiento se mantiene por debajo de los 2 grados centígrados con respecto a las temperaturas preindustriales (algo a lo que más tarde se comprometerían las naciones en el Acuerdo de París, adoptado en 2015). Otro considera un futuro distópico caracterizado por la quema intensiva de combustibles fósiles y carente de medidas políticas para atemperar el cambio climático. Este último escenario, llamado RCP8,5, nos aboca a un calentamiento de casi 5 ºC a finales de siglo.

El propósito original del RCP8,5 era explorar cómo podría ser un futuro arriesgado y poco probable. Sin embargo, ha sido ampliamente usado por parte de algunos expertos, responsables políticos y medios de comunicación como algo completamente distinto: como una predicción de lo que probablemente ocurrirá si nadie toma medidas para paliar el calentamiento. Una parte considerable de las publicaciones sobre impactos climáticos ha estado presentando el escenario RCP8,5 como sinónimo de qué sucederá «si nada cambia» (*business as usual*), dando a entender que dicha proyección describe el resultado más probable si no se aplican políticas de mitigación climática. Los medios de comunicación han amplificado a menudo este mensaje, en ocasiones sin entrar en matices. Ello ha creado una confusión aún mayor sobre las posibles consecuencias de las emisiones,

dado que numerosos climatólogos no están familiarizados con las publicaciones sobre modelos energéticos ni con los detalles que implica cada escenario.

Todo lo anterior se torna especialmente problemático cuando se compara el peor de los casos posibles con el más optimista, particularmente en trabajos académicos de alto nivel. Estos incluyen algunos informes del IPCC, como el AR5 y el informe especial publicado el año pasado sobre la repercusión del cambio climático en los océanos y la criosfera. Eso provoca que la atención se centre en los extremos, en lugar de en la multitud de caminos intermedios y más probables.

Felizmente —y esta es una palabra que rara vez usamos los climatólogos—, el mundo vaticinado por el RCP8,5 es uno que, en nuestra opinión, se torna más y más inverosímil con cada año que pasa. Para que las emisiones conduzcan a la situación contemplada en el RCP8,5, la quema de carbón tendría que experimentar un aumento sin precedentes y quintuplicarse de aquí a finales de siglo. Ello implicaría usar más carbón del que algunas estimaciones consideran que queda disponible en el planeta. Se cree que el consumo global de este combustible alcanzó su máximo en 2013. Y aunque un aumento todavía es posible, numerosos pronósticos prevén que se estabilizará en las próximas décadas. A ello hay que sumar que el abaratamiento experimentado por las energías limpias tiene pocos visos de revertirse, incluso en ausencia de nuevas medidas climáticas.

Una evaluación de las políticas actuales indica que el planeta se está encaminando hacia un calentamiento de 3 ºC para finales de siglo. Esto sigue siendo un resultado catastrófico, pero muy alejado de los 5 ºC. No podemos conformarnos con 3 ºC, pero tampoco deberíamos obviar el progreso realizado hasta ahora.

ESCENARIOS CLIMÁTICOS

Las Trayectorias de Concentración Representativas (RCP, por sus siglas en inglés) son cuatro posibles escenarios climáticos hasta finales de siglo. Fueron usados ampliamente en el Quinto Informe de Evaluación (AR5) del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), publicado en 2014. Sin embargo, no se basan en un conjunto coherente de supuestos socioeconómicos que vayan a determinar las emisiones futuras, sino que se limitan a reflejar una serie de posibles resultados climáticos. Estos escenarios se denominan RCP2,6, RCP4,5, RCP6,0 y RCP8,5, donde el número indica el forzamiento radiativo adicional en 2100 con respecto a la época preindustrial. El forzamiento radiativo, expresado en vatios por metro cuadrado, mide la influencia combinada de las emisiones de gases con efecto invernadero y otros factores (como la concentración de aerosoles atmosféricos) en el calentamiento planetario. El forzamiento radiativo actual asciende a unos 2,5 vatios por metro cuadrado con respecto a los niveles preindustriales.

Por su parte, las Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP) comprenden cinco rutas tecnológicas y socioeconómicas que el mundo podría seguir a lo largo de este siglo. Cada una emplea un punto de referencia en el que se considera que no se implantarán políticas climáticas a partir de 2010, lo que conllevará un calentamiento de entre 3 ºC y 5 ºC por encima de los niveles preindustriales para 2100. Por otro lado, las SSP pueden también combinarse con políticas climáticas a fin de analizar distintos resultados a finales del siglo (análogos a los escenarios RCP) con forzamientos radiativos de 1,9, 2,6, 3,4, 4,5, 6,0, 7,0 u 8,5 vatios por metro cuadrado en 2100. El Sexto Informe de Evaluación (AR6) del IPCC, cuya publicación se prevé en 2021-2022, ha seleccionado un conjunto de modelos SSP, los cuales funcionarán de manera similar a los RCP del informe de 2014.

Planificar el progreso

Algunos investigadores defienden que el escenario RCP8,5 podría ser más probable de lo que se pensó en un principio. Ello se debe a la existencia de varios procesos de retroalimentación (como la liberación de gases de efecto invernadero debida al deshielo del permafrost), los cuales podrían ser mayores de lo que estiman los modelos climáticos actuales. Tales expertos aducen que las emisiones presentes se hallan en consonancia con el peor de los escenarios posibles. Sin embargo, creemos que el historial de emisiones de la última década indica que estas se hallan en sintonía con los escenarios intermedios. En nuestra opinión, las voces críticas solo están considerando los casos extremos y suponiendo que todas las probabilidades están inclinadas hacia el peor de los resultados posibles.

Preguntarse qué es lo peor que podría ocurrir constituye un ejercicio útil, ya que alerta sobre los riesgos potenciales asociados a los extremos. En este sentido, el RCP8,5 aportó una manera conveniente de comparar modelos climáticos a lo largo de un extenso período de tiempo. Tal vez por ello, la comunidad dedicada a las simulaciones climáticas llegase a señalar que el RCP8,5 «debería considerarse la máxima prioridad».

Todos —desde físicos y expertos en modelización climática hasta comunicadores y responsables políticos— deberíamos dejar de presentar el peor de los casos posibles como el más probable. Exagerar la probabilidad de un futuro climático extremo puede hacer que las medidas de mitigación parezcan más difíciles de implantar de lo que realmente son. Eso puede conducir al derrotismo, al provocar que el problema se perciba como incontrolable e irresoluble. Y más importante aún, podría derivar en una planificación deficiente. Por el contrario, tomar como referencia un abanico de escenarios más realistas fortalecería la evaluación del riesgo climático.

Nada de esto resta urgencia a la acción climática. La necesidad de limitar el calentamiento a 1,5 ºC, como propugnaba el informe especial publicado por el IPCC en 2018, no depende de tener como contrapunto un calentamiento de 5 ºC.

Evaluaciones realistas

La proliferación de escenarios sobre emisiones futuras plantea todo un reto a quienes deben usar esos datos, desde responsables políticos hasta inversores. En 2014, el Quinto Informe de Evaluación del IPCC consideró más de 1200 escenarios. Y en 2018, el informe especial sobre un calentamiento de 1,5 ºC empleó otros 400. La mayoría de ellos toma como punto de referencia un mundo sin políticas climáticas a lo largo de un abanico de desarrollos socioeconómicos. A juzgar por nuestra experiencia trabajando con quienes usan estos escenarios, semejante abundancia de modelos confunde más que aclara, sobre todo en ausencia de una guía que permita asignar probabilidades relativas a cada escenario.

Otras organizaciones trabajan con menos casos. La Agencia Internacional de la Energía, por ejemplo, actualmente

solo considera tres escenarios principales. El de Políticas Actuales indica lo que podría suceder con las emisiones si la situación presente no varía. El de Políticas Declaradas integra los actuales propósitos y objetivos políticos. Por último, el de Desarrollo Sostenible refleja las emisiones en un mundo acorde con las metas establecidas en el Acuerdo de París. Por su parte, el Informe sobre la Brecha de Emisiones elaborado por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente adopta un enfoque similar y compara los compromisos en reducción de emisiones alcanzados por los países con las trayectorias globales que limitan el calentamiento a menos de 2 ºC. Ninguna de estas influyentes instituciones se centra en el peor caso posible, sino que analizan el abismo entre el camino que el mundo está siguiendo y el que se ha acordado que debería seguir.

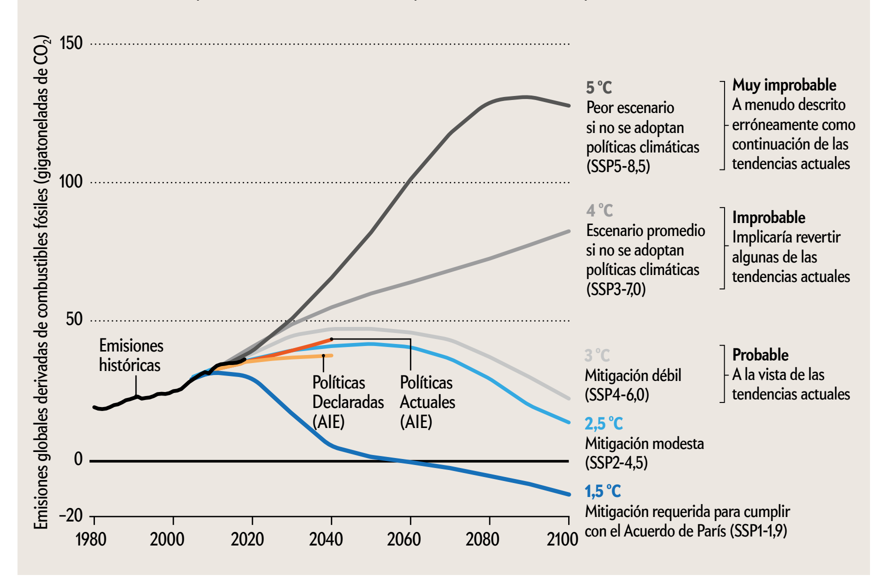
Para quienes toman decisiones en la vida real, considerar un escenario u otro resulta fundamental. Insistir en una adaptación al caso extremo reflejado en el RCP8,5, correspondiente a un calentamiento de 5 ºC en 2100, no casa bien con el objetivo de adaptarnos y reducir las vulnerabilidades a corto plazo. La mayoría de quienes usan los escenarios climáticos se preocupan más por el estado actual del mundo que por lo que podría haber ocurrido si el ritmo de emisiones globales no se hubiera enlentecido durante la última década. A quienes se centran en la mitigación les interesa aprovechar cualquier oportunidad emergente, como el abaratamiento de las energías renovables, así como evitar invertir en exceso en activos inutilizables pertenecientes a sectores industriales en extinción. Por ejemplo, les gustaría saber si, debido a la rápida disminución de costes de las energías renovables, invertir en combustibles fósiles podría convertirse en una actividad de alto riesgo. Si tomamos como referencia el RCP8,5, tales propósitos se vuelven inútiles, dado que dicho escenario implica que las políticas climáticas y el progreso tecnológico logrado hasta ahora van a detenerse o incluso revertirse.

A los responsables políticos, las medidas de mitigación basadas en los escenarios de altas emisiones, como el RCP8.5, les parecerán desmesuradas, puesto que no incorporan el desplome de los costes que a lo largo de la última década han experimentado numerosas tecnologías bajas en emisiones de carbono. Las inversiones marginales requeridas para pasar de un calentamiento de 3 ºC a uno inferior a 2 ºC (el principal objetivo de París) serán mucho menores que para pasar de 5 ºC a menos de 2 ºC. Un relato de progreso y oportunidad puede hacer que los objetivos del Acuerdo de París parezcan factibles en lugar de imposibles.

FUTUROS POSIBLES

Para analizar los posibles cambios futuros en el uso de la energía, en las emisiones y en la temperatura, el IPCC emplea distintos escenarios. El Sexto Informe de Evaluación (AR6) del organismo debería usar las nuevas trayectorias (SSP) de un modo más apropiado que las anteriores (RCP). Es improbable que un futuro en el que no se adopten políticas de acción climática dé como resultado el peor de los escenarios posibles. Otras trayectorias más realistas constituirían un mejor punto de referencia para impulsar el enorme esfuerzo político que requerirá mantener el aumento de la temperatura global por debajo de 1,5 ºC con respecto a los niveles preindustriales.

Esta gráfica muestra la evolución de las emisiones registradas hasta ahora (*negro*), las consideradas en las trayectorias SSP del IPCC (*gris, azul*) y las que implicarían dos de los tres escenarios principales con los que trabaja la Agencia Internacional de la Energía (AIE, *rojo, naranja*). El escenario SSP5–8,5 sustituye al RCP8,5 actual. Las temperaturas indican el calentamiento previsto en 2100 con respecto a los niveles preindustriales.



Hacia escenarios basados en riesgos

Cada vez más, quienes han de tomar decisiones a partir de la información que proporcionan los distintos escenarios exigen adoptar un enfoque basado en riesgos para facilitar la adaptación y la mitigación. Dicho enfoque tiene en cuenta las probabilidades relativas de los diferentes resultados. Y, de forma controvertida, requiere que los investigadores asignen probabilidades a los distintos escenarios. Hay voces críticas que rechazan este método, puesto que lo ven como un proceso arbitrario. Sin embargo, cuando los expertos se niegan a asignar probabilidades, a menudo son otros quienes lo acaban haciendo. Y la mayoría lo hará de manera deficiente, al carecer de conocimientos sobre los supuestos en que se basan los distintos escenarios.

En un principio, esas probabilidades no tienen por qué ser minuciosas. Incluso podrían limitarse a identificar el escenario más probable a partir de las tendencias y políticas actuales del sistema energético. Hoy los escenarios se seleccionan en función de sus resultados climáticos en 2100, no de sus probabilidades. Un enfoque probabilístico más complejo requeriría que quienes elaboran los modelos trabajasen de otra forma; por ejemplo, forjando nuevas alianzas con expertos en ciencias sociales e integrando tanto a responsables políticos e inversores como a la industria.

Todo ello requerirá años de trabajo. Mientras tanto, durante el próximo año, en el período previo a la publicación del Sexto Informe de Evaluación (AR6) del IPCC, deberían darse tres pasos. La última

FUENTES: «GLOBAL CARBON BUDGET 2019», PIERRE FRIEDLINGSTEIN ET AL. EN *EARTH SYSTEM SCIENCE DATA*, VOL. 11, PÁGS. 1783-1838, DICIEMBRE DE 2019 (*datos históricos*); «THE SHARED SOCIOECONOMIC PATHWAYS AND THEIR ENERGY, LAND USE, AND GREENHOUSE GAS EMISSIONS IMPLICATIONS: AN OVERVIEW», KEYWAN RIAHI ET AL. EN *GLOBAL ENVIRONMENTAL CHANGE*, VOL. 42, PÁGS. 153-168, ENERO DE 2017/«SCENARIOS TOWARDS LIMITING GLOBAL MEAN TEMPERATURE INCREASE BELOW 1.5 ºC», JOERI ROGELJ ET AL. EN *NATURE CLIMATE CHANGE*, VOL. 8, PÁGS. 325-332, MARZO DE 2018/BASE DE DATOS SSP (*escenarios SSP*); *WORLD ENERGY OUTLOOK*, AGENCIA INTERNACIONAL DE LA ENERGÍA, 2019 (*escenarios AIE*)

generación de modelos climáticos acaba de ver la luz, y muchos investigadores ya están seleccionando qué escenarios de emisiones futuras deberían usar en sus trabajos.

En primer lugar, la nueva generación de escenarios, denominados Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP, por sus siglas en inglés) presenta un enfoque mucho más matizado de las situaciones de referencia, y los expertos del IPCC pueden destacar toda una serie de resultados en un mundo sin nuevas políticas climáticas. El AR6 debería analizar con más detalle el espacio que media entre los casos extremos, a fin de que los efectos climáticos que probablemente acabaremos experimentando puedan comunicarse con mayor claridad. Por ejemplo, un buen número de estudios indican que nos estamos dirigiendo hacia un mundo con un calentamiento de 3 °C, por lo que sería prudente describir con detalle las repercusiones climáticas de dicho caso, además de las de un calentamiento de 5 °C.

En segundo lugar, los científicos deberían admitir que los distintos usuarios de los modelos pueden necesitar herramientas diferentes. En el marco del AR6, ello podría requerir que los diversos grupos de trabajo (centrados en climatología, impactos y mitigación) destaquen distintos escenarios en sus análisis. De esta manera, la síntesis final del AR6 podría integrar diferentes perspectivas de riesgo.

Por último, sugerimos que los trabajos sobre impactos climáticos que usen los modelos desarrollados para el AR6 incluyan escenarios más plausibles, como el SSP2-4,5, SSP4-6,0 y SSP3-7,0 (*véase el recuadro* «Futuros posibles»). Y que cuando se use el RCP8,5 o su sucesor, el SSP5-8,5, se deje bien claro que se trata de un escenario poco probable que describe el peor de los casos posibles, no lo que probablemente ocurrirá en ausencia de medidas climáticas.

Zeke Hausfather *es director de asuntos climáticos y energéticos en el Instituto Breakthrough, en California.*
Glen P. Peters *es director de investigación en el Centro Internacional de Investigación Climática y Ambiental (CICERO), en Oslo.*

Artículo original publicado en *Nature*, vol. 577, págs. 618-620, 2020. Traducido con el permiso de Nature Research Group © 2020

Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

The next generation of scenarios for climate change research and assessment. Richard H. Moss et al. en *Nature*, vol. 463, págs. 747-756, febrero de 2010.
RCP 8.5: A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. Keywan Riahi et al. en *Climatic Change*, vol. 109, págs. 33-57, noviembre de 2011.
The representative concentration pathways: An overview. Detlef P. van Vuuren et al. en *Climatic Change*, vol. 109, págs. 5-31, noviembre de 2011.
Paris Agreement climate proposals need a boost to keep warming well below 2 °C. Joeri Rogelj et al. en *Nature*, vol. 534, págs. 631-639, junio de 2016.
The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. Keywan Riahi et al. en *Global Environmental Change*, vol. 42, págs. 153-168, enero de 2017.
Explainer: The high-emissions 'RCP8.5' global warming scenario. Zeke Hausfather en *Carbon Brief*, 21 de agosto de 2019. Disponible en **www.carbonbrief.org/explainer-the-high-emissions-rcp8-5-global-warming-scenario**

EN NUESTRO ARCHIVO

Calentamiento global: ¿Más rápido de lo previsto? John Carey en *IyC*, enero de 2013.
Es hora de abandonar el objetivo de los 2 °C. David G. Victor y Charles F. Kennel en *IyC*, marzo de 2015.
Difícil, pero no imposible. Michael E. Mann en *IyC*, diciembre de 2015.

PALEONTOLOGÍA

Nuevas pistas sobre el origen del bipedismo

El reciente hallazgo de los fósiles de un simio extinto hace replantear la evolución de nuestro peculiar modo de locomoción

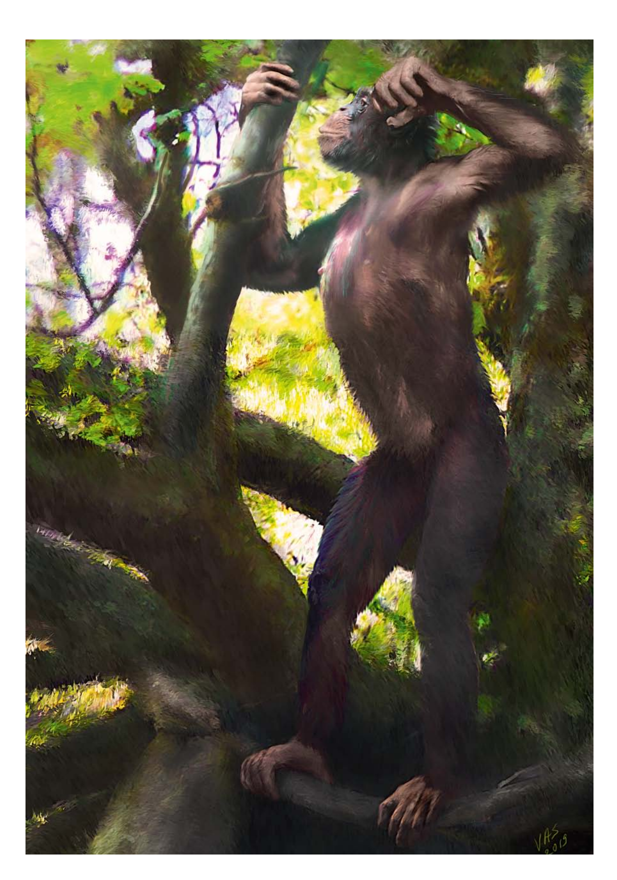
TRACY L. KIVELL

Desde que los estudios de Charles Darwin sentaran las bases para comprender la evolución humana, las preguntas sobre cuándo, por qué y cómo nuestros ancestros empezaron a caminar sobre los dos pies siguen abiertas. El bipedismo, caracterizado por adaptaciones en el esqueleto para andar erguidos de forma habitual, es un rasgo distintivo que permite asignar los fósiles al linaje de los homininos (todas las especies más cercanas a la nuestra que al chimpancé o al bonobo, nuestros parientes vivos más próximos). A tenor de las pruebas fósiles existentes, algunas más controvertidas que otras, se piensa que la respuesta al «cuándo» es entre 7 y 5 millones de años atrás, al final de la era del Mioceno (hace entre 23 y 5 millones de años).

Las respuestas al «por qué» y «cómo» evolucionó la marcha bípeda en los homininos dependen en buena medida del tipo de locomoción primitivo que dio origen al bipedismo terrestre. ¿Evolucionó a partir de un ancestro que vivía sobre todo en los árboles, o de un cuadrúpedo que ya andaba por el suelo antes de erguirse y empezar a caminar sobre los dos pies? En un artículo de *Nature*, Madeleine Böhme, de la Universidad de Tubinga, y sus colaboradores presentan el descubrimiento en Baviera de los restos de un simio de mediados del Mioceno al que han bautizado *Danuvius guggenmosi*. Esta especie se desplazaba de una manera hasta ahora desconocida y, según los autores, podría ofrecer un modelo del tipo de locomoción a partir de la cual surgió el bipedismo en los homininos.

Dos perspectivas de estudio

Los interrogantes en torno al origen del bipedismo y cómo se movía el último ancestro común de los humanos, los chimpancés y los bonobos suelen abordarse mediante dos metodologías: de arriba abajo o de abajo arriba. Darwin y muchos paleoantropólogos confiaron en la primera estrategia, que recurre al estudio de los primates actuales, en especial los grandes simios, para hallar pistas sobre la evolución de la marcha bípeda. Los



EL SIMIO EXTINTO *Danuvius guggenmosi* se habría movido por las ramas con la ayuda de los brazos y sobre la planta de los pies. Sus fósiles, hallados en Baviera, ofrecen nuevos datos sobre el origen de nuestro bipedismo.

simios africanos (chimpancés, bonobos y gorilas) se encaraman a los árboles para comer, dormir o refugiarse, pero pasan la mayor parte del tiempo en el suelo empleando los nudillos para caminar. Dado nuestro estrecho parentesco genético con estos primates y el hecho de que compartimos con ellos ciertos rasgos en manos y pies, algunos autores han inferido que el bipedismo en los homininos evolucionó a partir de un ancestro que caminaba sobre los nudillos, o bien de un cuadrúpedo más generalizado sin este tipo de marcha, que repartía su tiempo entre el suelo y los árboles. Por el contrario, otros investigadores han aducido que la postura bípeda que adoptan los orangutanes para moverse por los árboles, y las similitudes mecánicas entre el uso de las extremidades inferiores en los simios para trepar y en los humanos para caminar, reflejan que el bipedismo surgió a partir de un primate adaptado a la vida en los árboles.

Aunque razonable, esta metodología de arriba abajo se ve limitada, como reconoció el propio Darwin, al análisis de las pistas aportadas por las pocas especies de grandes simios que siguen vivas. Sin embargo, se ha esgrimido que la anatomía de uno de los primeros posibles homininos del que disponemos de un mayor registro fósil —*Ardipithecus ramidus,* de hace unos 4,4 millones de años— es claramente distinta a la de los grandes simios actuales. Ello parece indicar que los simios africanos y los orangutanes asiáticos de hoy despliegan comportamientos locomotores bastante especializados, en comparación con sus ancestros primitivos. Cada especie viva de primate es el resultado de su propia y larga historia evolutiva y, en el caso de los simios africanos, la solemos olvidar, dado el escaso registro fósil que ha dejado. La ausencia de restos que aclaren cómo evolucionaron los simios africanos complica aún más poder dar respuesta a los interrogantes sobre la naturaleza de nuestro ancestro común.

Otros paleoantropólogos se enfrentan al debate sobre el origen del bipedismo desde una perspectiva de abajo arriba. Estudian los cerca de 30 géneros extintos de simios que vivieron en África, Asia y Europa durante el Mioceno como posibles modelos del aspecto que pudo tener nuestro último ancestro común. No obstante, estos primates muestran toda una variedad de adaptaciones esqueléticas con una combinación de características que no se asemeja en nada a las actuales, lo que lleva a preguntarnos cómo se movían estos animales por su entorno y cuánto tiempo pasaban en los árboles o en el suelo.

Por ejemplo, entre los simios extintos, el género *Nacholapithecus* poseía un cuerpo similar al de los simios inferiores, pero extremidades superiores inusualmente grandes y pies con largos dedos. En cambio, el género *Sivapithecus* presentaba un rostro parecido al del orangután y una articulación del hombro próxima a la de los simios superiores, a diferencia de la del codo y la pelvis, que se asemejaba a la de los simios inferiores. Estas características dejan entrever extrañas mezclas de suspensión arbórea, movimientos cuadrúpedos y posturas corporales que son difíciles de imaginar hoy en día, lo que dificulta la interpretación de los posibles patrones locomotores de estas especies.

Böhme y sus colaboradores han sumado a esta increíble diversidad del Mioceno los fósiles de *D. guggenmosi,* de hace unos 11,6 millones de años. Los autores interpretan su anatomía como reveladora de un tipo de locomoción hasta ahora desconocida que denominan «trepar con los miembros extendidos» y que combina adaptaciones tanto para colgarse de los árboles como para desplazarse de forma bípeda. Esto lo convierte en un buen modelo de la posible forma de locomoción que empleaba nuestro último ancestro común.

Un mosaico de adaptaciones

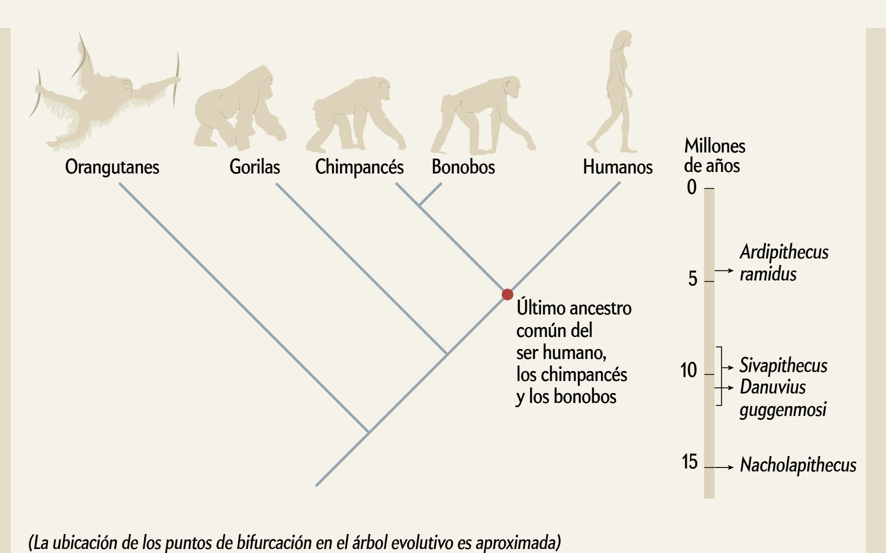
Los dientes de *D. guggenmosi* lo clasifican en el grupo de los driopitecinos, primates extintos que vivieron entre mediados y finales del Mioceno en Europa y que algunos señalan como antepasados de los grandes simios africanos. Si bien las especies actuales se hallan en la región ecuatorial de África, muchos de sus ancestros habitaron por toda Europa y Asia en ciertos períodos del Mioceno y emprendieron migraciones desde y hacia el continente africano. Algunos investigadores mantienen que los driopitecinos comparten rasgos con los chimpancés y los gorilas actuales y que, por lo tanto, son un buen candidato como posible ancestro de los simios africanos. El esqueleto de *D. guggenmosi* es único entre el resto de driopitecinos, tanto por el estado de conservación, casi completo, de dos huesos de las extremidades —una ulna (hueso del antebrazo) y una tibia (hueso de la pierna)— como por la combinación de características que presenta. El equipo de Böhme centró la atención en un esqueleto parcial, lo más probable de un macho, del tamaño de un babuino. Además de la ulna y la tibia, el esqueleto incluye algunas vértebras, parte del fémur y huesos de las manos y los pies.

VELIZAR SIMEONOVSKI

INDAGAR EN EL ORIGEN DEL BIPEDISMO

LOS HUMANOS Y NUESTROS PARIENTES HOMININOS EXTINTOS, pertenecientes a la rama evolutiva que se separa de nuestro último ancestro común con los chimpancés y los bonobos, poseemos un esqueleto adaptado al bipedismo. Para dilucidar el modo en que evolucionó nuestra forma de locomoción se emplean dos métodos: de arriba abajo y de abajo arriba. Los fósiles recién hallados se han interpretado con el segundo de ellos.

Método de arriba abajo
Intenta deducir formas primitivas de locomoción en base a cómo se mueven hoy los grandes simios. Los chimpancés, los bonobos y los gorilas suelen desplazarse sobre los nudillos en el suelo, más que por los árboles, y, al igual que los orangutanes, también trepan por ellos y se suspenden de las ramas. Sin embargo, los fósiles de uno de los primeros homininos, *Ardipithecus ramidus*, dejan entrever que los simios actuales habrían desarrollado una locomoción bastante especializada, en comparación con sus antepasados próximos. Ello dificulta saber la naturaleza del último ancestro común de humanos y simios.



(La ubicación de los puntos de bifurcación en el árbol evolutivo es aproximada)

Método de abajo arriba
Pone el foco en los fósiles de simios extintos anteriores a nuestro último ancestro común, como *Nacholapithecus* o *Sivapithecus*. No obstante, las pistas que encierran sus restos pueden ser difíciles de interpretar. Los fósiles de un simio hasta ahora desconocido, bautizado *Danuvius guggenmosi*, podrían ofrecer un buen modelo del tipo de locomoción a partir del cual evolucionó el bipedismo.

La longitud de la ulna respecto a la tibia refleja que el antebrazo de *D. guggenmosi* era largo en comparación con su pierna, tal y como ocurre en el bonobo. Junto con el codo flexible y los huesos de las manos que indican la existencia de un fuerte pulgar prensil y dedos curvos, la extremidad superior nos cuenta una historia de seres que se suspendían de las ramas de los árboles como lo hacen todos los grandes simios actuales.

Sin embargo, las extremidades inferiores de *D. guggenmosi* narran un relato distinto, ya que recuerdan más a las piernas de los humanos que a las de otros grandes simios. La forma de las articulaciones del fémur y la tibia sugieren la adopción de posturas extendidas (erguidas) de las rodillas y la cadera, las cuales difieren de las exhibidas por los simios africanos actuales, que las doblan cuando alguna vez caminan de forma bípeda en el suelo o por los árboles. La parte superior de la tibia está reforzada y la articulación del tobillo es estable, dos adaptaciones que permiten aguantar la mayor carga que deben soportar las extremidades inferiores al abandonar la locomoción cuadrúpeda por la bípeda. Por el contrario, el dedo gordo del pie es largo y robusto, rasgos que lo hacen idóneo para agarrarse y que apuntan a que *D. guggenmosi* podría haber caminado por las ramas sobre la planta de los pies. Queda menos claro si empleaba o no de forma habitual en el suelo la marcha bípeda.

En conjunto, es razonable defender que el mosaico de características de *D. guggenmosi* ofrece el mejor modelo hasta ahora del posible aspecto que tuvo el ancestro común de los humanos y los grandes simios africanos. Posee rasgos para todos los gustos: extremidades superiores adaptadas a la vida en los árboles que todos los grandes simios actuales conservan, incluida nuestra especie; extremidades inferiores adecuadas para la postura erguida que adquieren los orangutanes cuando se desplazan de forma bípeda por los árboles; y una mayor especialización de las extremidades inferiores, que, como en los humanos, posibilita el bipedismo habitual en el suelo.

Si aceptamos que los comportamientos locomotores de los grandes simios actuales y los humanos evolucionaron de un ancestro que se desplazaba trepando con los miembros extendidos, podríamos explicar el tipo de locomoción primitiva que dio origen a nuestro bipedismo. Ello nos ayudaría a averiguar por qué y cómo nuestros ancestros humanos se volvieron menos dependientes de la vida en los árboles y apostaron de pleno por la locomoción bípeda en el suelo. Hasta que no se descubran más pruebas fósiles de cómo evolucionaron los grandes simios africanos, la metodología de abajo arriba, desde el Mioceno hasta nuestros días, es con toda probabilidad la mejor manera de comprender cómo surgió uno de nuestros rasgos humanos más distintivos.

Tracy L. Kivell *es investigadora de la Facultad de Antropología y Conservación de la Universidad de Kent y del Instituto Max Planck de Antropología Evolutiva de Leipzig.*

Artículo original publicado en *Nature*, vol. 575, págs. 445-446, 2019. Traducido con el permiso de Nature Research Group © 2019

Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

Origin of human bipedalism as an adaptation for locomotion on flexible branches. Susannah K. S. Thorpe, Roger L. Holder y Robin H. Crompton en *Science*, vol. 316, n.º 5829, págs. 1328-1331, junio de 2007.
Arboreality, terrestriality and bipedalism. Robin H. Crompton, William I. Sellers y Susannah K. S. Thorpe en *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, vol. 365, págs. 3301-3314, octubre de 2010.
A new Miocene ape and locomotion in the ancestor of great apes and humans. Madelaine Böhme et al. en *Nature*, vol. 575, págs. 489-493, noviembre de 2019.

EN NUESTRO ARCHIVO

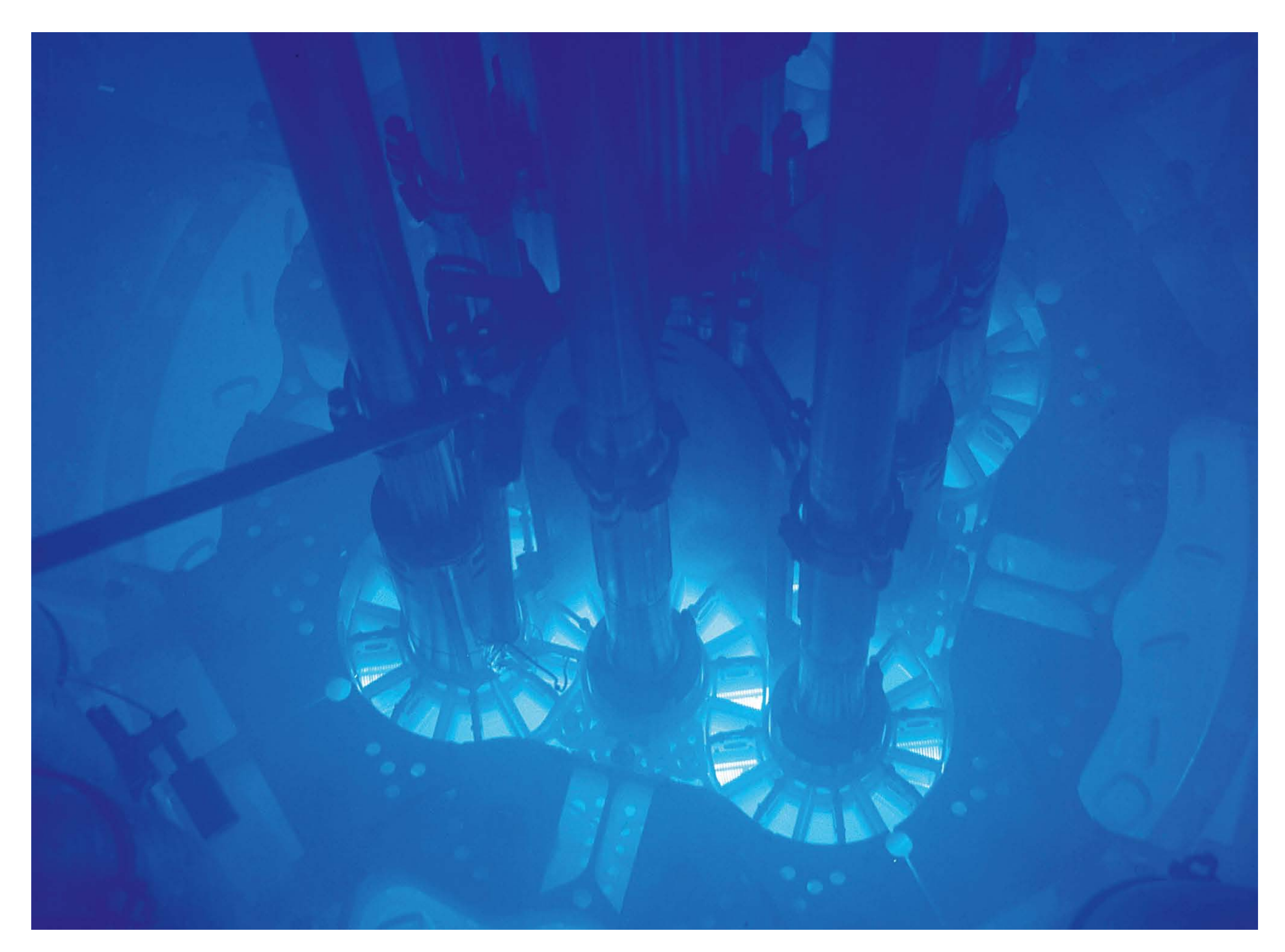
La hija de Lucy. Kate Wong en *IyC*, febrero de 2007.

FÍSICA DE PARTÍCULAS

¿Producen los reactores nucleares neutrinos estériles?

Una nueva técnica apunta a la resolución de un rompecabezas que desde hace una década ocupa a los físicos de neutrinos. Los resultados serán clave para interpretar los datos de futuros experimentos

ALEJANDRO ALGORA Y JOSÉ LUIS TAÍN



NÚCLEO de un reactor nuclear experimental en el Laboratorio Nacional de Idaho, en Estados Unidos. Hace años que los físicos intentan conocer con precisión el espectro de neutrinos que emiten estas instalaciones.

Uno de los grandes objetivos de la física fundamental hoy en día consiste en buscar indicios de fenómenos que vayan más allá del modelo estándar, el esquema teórico empleado desde hace años por los físicos para describir todas las partículas elementales y sus interacciones. En esta carrera, un papel de especial relevancia lo desempeñan los neutrinos: esquivas partículas de masa ínfima y carentes de carga eléctrica.

La existencia del neutrino fue propuesta en los años treinta del siglo pasado por Wolfgang Pauli como posible solución al problema de la conservación de la energía en la desintegración beta, el proceso por el que un neutrón de un núcleo atómico se transforma espontáneamente en un protón, un electrón y —según la propuesta de Pauli— un antineutrino. Sin embargo, al tratarse de una partícula que apenas interacciona con las demás, su detección no llegó hasta un cuarto de siglo después. Esta se logró gracias a un experimento pionero efectuado en la central nuclear de Savannah River, en Carolina del Sur, por Clyde Cowan y Frederick Reines, quien en 1995 recibiría por ello el premio Nobel de física (Cowan falleció en 1974).

No es difícil entender por qué el experimento de Cowan y Reines se llevó a cabo en un reactor nuclear. La razón se debe a que estas instalaciones constituyen

las mayores fuentes pacíficas de neutrinos jamás creadas por el ser humano. En una central moderna de un gigavatio de potencia, las reacciones nucleares que tienen lugar en su interior emiten del orden de 10^{21} antineutrinos por segundo.

Hasta ahora, sin embargo, las características de los neutrinos generados por una central nuclear no coincidían por completo con las predicciones teóricas, un desacuerdo que a lo largo de los años ha dado lugar a interesantes elucubraciones. En un trabajo publicado el año pasado en *Physical Review Letters*, una colaboración internacional en la que ha participado nuestro grupo de investigación del Instituto de Física Corpuscular (IFIC) de Valencia ha conseguido un avance clave en la resolución del rompecabezas. Los resultados suponen un paso importante hacia una mejor comprensión de estas enigmáticas partículas y serán cruciales a la hora de interpretar los datos de experimentos futuros.

Partículas desconocidas

El modelo estándar contempla la existencia de tres tipos de neutrino: el electrónico, el muónico y el tauónico, en principio todos ellos sin masa. Sin embargo, a finales del siglo pasado se descubrió que los neutrinos de un tipo pueden transformarse espontáneamente en neutrinos de otro, un fenómeno conocido como «oscilación». La importancia de este hallazgo radica en que, según las leyes de la mecánica cuántica, dicho proceso solo puede tener lugar si los neutrinos tienen masa. Así pues, el descubrimiento de las oscilaciones de neutrinos obligó a abandonar la hipótesis de que estas partículas tenían masa nula y supuso una señal de física más allá del modelo estándar «tradicional».

El proceso de las oscilaciones de neutrinos queda descrito por varios parámetros. Estos son esencialmente las diferencias de los cuadrados de las masas que pueden asociarse a estas partículas, así como tres cantidades adicionales conocidas como «ángulos de mezcla». Determinar experimentalmente estos parámetros exige usar técnicas complementarias y muy ingeniosas.

Una de ellas se basa en usar aceleradores para generar un tipo concreto de neutrino, y luego detectar a una gran distancia de la fuente cuántas de las partículas originales se han transmutado en neutrinos de otra clase. Otros experimentos usan como fuente un reactor nuclear e intentan medir la probabilidad de «supervivencia» de los neutrinos generados en él; es decir, la probabilidad de que los (anti)neutrinos electrónicos producidos en el reactor recorran una cierta distancia sin transformarse en neutrinos muónicos o tauónicos.

En este tipo de experimentos, la detección de los neutrinos se basa en la desintegración beta inversa. En ella, un antineutrino electrónico es absorbido por un núcleo de hidrógeno (un protón), el cual se transforma en un neutrón y un positrón (la antipartícula del electrón). Sin embargo, la probabilidad de que se produzca esta reacción crece rápidamente con la energía del antineutrino, por lo que la eficiencia del proceso de detección es muy sensible al espectro de energías de los antineutrinos emitidos en el reactor. Por tanto, estos experimentos requieren conocer con gran precisión cuántos neutrinos de cada energía se generan en una central nuclear.

En principio, dicho espectro puede calcularse si conocemos la composición inicial del combustible nuclear, la proporción de los distintos productos de fisión que se generan en el proceso (cada fisión de un átomo de combustible da lugar a otros isótopos radiactivos y a una cadena de múltiples desintegraciones beta) y la energía de los neutrinos asociados a cada uno de esos procesos. La pregunta es cómo obtener el espectro de neutrinos relacionado con cada isótopo fisible.

El enigma de los neutrinos ausentes

En los años ochenta se realizaron una serie de medidas en el reactor experimental del Instituto Laue-Langevin de Grenoble, las cuales permitieron determinar el espectro beta total emitido por los isótopos de combustible más relevantes (uranio-235, plutonio-239 y plutonio-241). Esos espectros beta totales se convirtieron después en espectros de neutrinos empleando la ley de conservación de la energía. No obstante, dicha conversión resulta compleja y obliga a hacer varias suposiciones adicionales.

En primer lugar, los espectros de neutrinos se compararon con los resultados de experimentos en los que la detección se había efectuado a muy poca distancia del reactor y donde, por tanto, no se habían registrado oscilaciones. Ese cotejo inicial entre los datos experimentales y los modelos de emisión fue considerado satisfactorio, lo que abrió la puerta a diseñar las primeras mediciones de oscilaciones con detectores situados a mayor distancia de los reactores.

En 2011, sin embargo, dos grupos reevaluaron de forma independiente el método de conversión a partir de la información disponible en aquel momento. La gran sorpresa fue que, al comparar la predicción del flujo de antineutrinos basado en los nuevos cálculos con las medidas realizadas en reactores a distancias cortas, se encontró un déficit del 6 por ciento en el número de antineutrinos detectados. Dicho déficit se conoce desde entonces como «anomalía de neutrinos de reactor».

¿A qué podía deberse esa ausencia de neutrinos? Al respecto, una emocionante perspectiva apuntaba a la existencia de «neutrinos estériles». Este nuevo tipo de neutrino fue postulado hace tiempo como posibilidad teórica, ya que explicaría de manera natural el hecho de que los neutrinos ordinarios posean masa, al tiempo que proporcionaría un excelente candidato para dar cuenta de la materia oscura. Debe su nombre a que no experimentaría ninguna de las interacciones contempladas por el modelo estándar, por lo que no se observaría en los detectores.

Así pues, en caso de que algunos de los neutrinos generados en un reactor oscilasen para convertirse en neutrinos estériles, el resultado sería un déficit en la cantidad de neutrinos ordinarios detectados: justo lo que parecía indicar la anomalía. Esta ha ocupado desde entonces a los investigadores, puesto que se sumaba a los resultados de otros experimentos que también habían sugerido la existencia de neutrinos estériles.

Pandemonio nuclear

No obstante, existen otras posibles explicaciones. Una de ellas es que el método de conversión mencionado anteriormente no sea del todo correcto. Por ello, resulta de gran interés buscar técnicas alternativas para llevar a cabo el cálculo de los neutrinos emitidos por una central nuclear.

Una opción es el llamado «método de la suma». Como su nombre indica, esta técnica se basa en sumar, con sus correspondientes pesos, el espectro de antineutrinos generado en cada desintegración beta que tiene lugar en un reactor. Para ello son necesarios varios datos, como la probabilidad de producir un determina-

CADENA COMPLEJA: La emisión de neutrinos en un reactor nuclear obedece a una serie de intrincados procesos muy difíciles de modelizar. Cuando un núcleo de uranio-235 se bombardea con neutrones (*no mostrados*), se transforma en un núcleo de uranio-236 que posteriormente se fisionará en otros núcleos más ligeros. Esta ilustración muestra uno de los múltiples canales de desintegración que puede seguir el proceso: los productos de fisión primarios (^{141}Ba y ^{92}Kr) sufren siete desintegraciones beta, en cada una de las cuales se emite un electrón (*e*) y un antineutrino electrónico ($\bar{\nu}_e$). En el proceso también se emiten varios neutrones adicionales (*no mostrados*).

do producto de fisión y la de cada desintegración beta posterior. Este objetivo puede parecer inalcanzable, ya que en un reactor se produce una enorme cantidad de productos de fisión (del orden de mil) y de desintegraciones beta distintas. Sin embargo, puede demostrarse que el 75 por ciento del espectro de neutrinos queda determinado por tan solo unas 50 desintegraciones. De esta manera, si identificamos las desintegraciones beta más relevantes y las medimos de la manera adecuada, podremos encontrar una descripción del espectro de neutrinos de un reactor alternativa a la que proporciona el método de conversión.

Con este objetivo en mente, y en colaboración con otros grupos, nuestro equipo de investigación ha estudiado durante más de una década las desintegraciones beta más relevantes para la física de reactores. Las medidas se han llevado a cabo en el Separador de Isótopos en Línea con Guía de Iones (IGISOL) de la Universidad de Jyväskylä, en Finlandia, el cual proporciona haces de gran pureza de los isótopos radiactivos de interés. Pero la principal mejora ha sido el uso de la técnica de «absorción total», en la cual nuestro grupo del IFIC es considerado un experto mundial.

Esta técnica proporciona datos de las desintegraciones beta libres del llamado «efecto Pandemonio»: un error sistemático en este tipo de experimentos asociado a la baja eficiencia de los detectores empleados habitualmente. Su denominación obedece al nombre que recibía la capital del infierno en la obra *El paraíso perdido*, del poeta inglés John Milton. En 1977, varios investigadores bautizaron así el efecto para recalcar la extrema complejidad de las desintegraciones beta, lo que conduce a la pérdida de información si estas no se estudian mediante las técnicas apropiadas.

Gracias al método de la suma, nuestro trabajo ha demostrado que el espectro de antineutrinos de la central nuclear de Daya Bay, en China, coincide con los cálculos con una precisión de hasta el 2 por ciento. La nueva técnica proporciona la mejor descripción disponible de la emisión de neutrinos por parte de un reactor nuclear y cuestiona la existencia de la anomalía que durante años había intrigado a los expertos.

Nuevas aplicaciones

El método de la suma presenta varias ventajas. Una de ellas es que puede aplicarse a cualquier combinación de combustible nuclear, por lo que podría usarse en el seguimiento de los planes de no proliferación de armas atómicas. La composición del combustible usado en una central nuclear es muy distinta de la que se necesita para fabricar armamento. Y dado que el nuevo método abre la puerta a desentrañar lo que ocurre en el interior de una instalación nuclear a partir del análisis de los neutrinos que esta emite, en un futuro podría permitir la construcción de detectores para localizar manipulaciones ilegales de combustible nuclear con fines armamentísticos.

Por otro lado, disponer de un conocimiento detallado del espectro de neutrinos emitido por un reactor será clave para los experimentos de oscilaciones de nueva generación. Uno de ellos será el Observatorio Subterráneo de Neutrinos de Jiangmen (JUNO), en el sur de China, el cual se espera que comience a operar en 2021 y que intentará determinar la llamada «jerarquía de masas» de los neutrinos; es decir, cómo se ordenan sus distintos estados de masa.

Alejandro Algora *y* ***José Luis Taín***
investigan en el Instituto de Física Corpuscular, un centro mixto del CSIC y la Universidad de Valencia.

PARA SABER MÁS

Reactor antineutrino anomaly. G. Mention et al. en *Physical Review D*, vol. 83, art. n.º 073006, abril de 2011.
Improved predictions of reactor antineutrino spectra. Th. A. Mueller et al. en *Physical Review C*, vol. 83, art. n.º 054615, mayo de 2011.
Determination of antineutrino spectra from nuclear reactors. P. Huber en *Physical Review C*, vol. 84, art. n.º 024617, agosto de 2011.
Updated summation model: An improved agreement with the Daya Bay antineutrino fluxes. M. Estienne et al. en *Physical Review Letters*, vol. 123, art. n.º 022502, julio de 2019.

EN NUESTRO ARCHIVO

En busca de la última transformación de los neutrinos. Inés Gil Botella, Pau Novella Garijo y Marco Cerrada Canals en *IyC*, diciembre de 2011.
Mensajeros fantasmales de nueva física. Martin S. Hirsch, Heinrich Päs y Werner Porod en *IyC*, junio de 2013.
El enigma de los neutrinos. Clara Moskowitz en *IyC*, diciembre de 2017.

INTELIGENCIA EXTRATERRESTRE

Una solución a la paradoja de Fermi

Aun si la Vía Láctea estuviera repleta de viajeros espaciales extraterrestres, no debería sorprendernos que no hayan visitado todavía nuestro planeta

Caleb Scharf

Ilustración de María Corte



Caleb Scharf es director del Centro de Astrobiología de la Universidad de Columbia y autor de varios libros, entre ellos *El complejo de Copérnico* (Biblioteca Buridán, 2016) y *The zoomable universe* (Scientific American/Farrar, Straus and Giroux, 2017).



El 15 de enero de 1790, nueve amotinados del *Bounty*, dieciocho hombres y mujeres de Tahití y un bebé llegaron a la isla de Pitcairn, uno de los lugares habitables más aislados del planeta. Rodeada por las aguas meridionales del océano Pacífico y a cientos de kilómetros de las islas más cercanas, Pitcairn es el paradigma de la soledad.

Antes de que hiciesen su aparición los fugitivos del *Bounty*, puede que la isla no hubiera presenciado ningún episodio de ocupación humana desde el siglo xv, cuando todavía estaba habitada por una comunidad polinesia que quizás existió durante siglos. Dicho período aparentemente culminó con el agotamiento de los recursos naturales y una serie de conflictos con otras islas lejanas que interrumpieron las rutas comerciales y de abastecimiento, lo que en la práctica supuso la extinción de la población de Pitcairn. Un lugar que era habitable se había vuelto insostenible hasta la llegada del *Bounty* aquel fatídico día de 1790. Sorprendentemente, pasaron dieciocho años hasta que otro barco ancló en sus costas, aunque los colonizadores dejaron constancia del avistamiento de otras embarcaciones que navegaban en la lejanía.

La historia de Pitcairn no es más que un ejemplo extremo de la inusual dinámica de la ocupación humana en el Pacífico Sur. Las regiones de Polinesia, Micronesia y Melanesia albergan decenas de miles de islas repartidas a lo largo de millones de kilómetros cuadrados de océano. Muchas de ellas apenas son protuberancias de roca y coral, y no todas las que son habitables están pobladas en un momento dado. Pero, en conjunto, representan un vasto paisaje de posible asentamiento y civilización para quienes se animen a navegar por las aguas más remotas de la Tierra.

Existe un asombroso paralelismo entre este entorno inconfundiblemente terrestre y nuestros alrededores cósmicos. En la Vía Láctea tal vez haya 300.000 millones de estrellas. Las mejores estimaciones basadas en los estudios de búsqueda de exoplanetas (como el que llevó a cabo el telescopio Kepler de la NASA) indican que en ese océano de cuerpos estelares podría haber más de 10.000 millones de pequeños mundos rocosos en configuraciones orbitales que propicien unas condiciones superficiales acogedoras. Como las islas terrestres, esas motas exoplanetarias podrían tanto generar como mantener sistemas vivos y constituir una red de paradas intermedias para cualquier especie dispuesta a emigrar a través del espacio interestelar. Y ahí es cuando las cosas se ponen interesantes.

Del mismo modo que los europeos acabaron comprendiendo que los habitantes del Pacífico Sur se habían diseminado a lo largo de sus miles de kilómetros de océano en sencillas embarcaciones que se deslizaban a unos pocos nudos de velocidad, hoy entendemos que extenderse por toda la galaxia no debería requerir mucho más que persistencia y una módica cantidad de tiempo cósmico.

Parece que el primero en percatarse de ello fue Enrico Fermi. Según reza la famosa historia, el físico italiano almorzaba con otros científicos en 1950 cuando espetó: «¿Nunca os preguntáis dónde está todo el mundo?». Con «todo el mundo» se refería a cualquier especie de viajeros espaciales, y con el tiempo su pregunta se convirtió en la igualmente célebre (aunque con un nombre un tanto engañoso) «paradoja de Fermi»: a menos que haya sumamente pocas, las especies tecnológicamente avanzadas ya deberían haberse diseminado por casi toda la galaxia. Y sin embargo, no vemos indicios de su existencia. Fermi, conocido por su habilidad para los cálculos mentales, había deducido de manera aproximada que sería posible colonizar la Vía Láctea

EN SÍNTESIS

Algunas extrapolaciones elementales indican que, de existir otras civilizaciones de viajeros espaciales en la Vía Láctea, podrían extenderse por toda la galaxia con sorprendente rapidez. Entonces, ¿por qué no parecen haber llegado a la Tierra?

Las respuestas más habituales a este enigma (que estamos solos, que es imposible realizar viajes interestelares o que los extraterrestres se esconden de nosotros) se basan en suposiciones que rayan en lo inverosímil.

La explicación más probable de la aparente soledad de la Tierra podría ser que los asentamientos galácticos ocurren en oleadas y nuestra especie ha surgido en un planeta fuera de ruta durante una tregua momentánea en la exploración interestelar.

en un abrir y cerrar de ojos cósmico, teniendo en cuenta que el tictac del reloj galáctico se mide en millones de años.

En 1975, el astrofísico Michael Hart realizó el primer estudio cuantitativo y detallado de la cuestión. En él planteó lo que hoy se conoce como el «hecho A» de Hart, que se refiere a la ausencia actual de extraterrestres en la Tierra. Esa verdad incuestionable (para la mayoría de personas sensatas) llevó a Hart a concluir que ni existen ni han existido otras civilizaciones tecnológicas en nuestra galaxia. La clave de tal afirmación, igual que en la idea original de Fermi, radica en el tiempo relativamente corto que tardaría una especie en extenderse a lo largo de los 100.000 años luz de la Vía Láctea, aun empleando sistemas de propulsión modestos y mucho más lentos que la luz.

El físico estadounidense Frank Tipler también estudió el problema, y en 1980 demostró, como Hart, que unos extraterrestres con la motivación adecuada podrían visitar toda la galaxia en unos pocos millones de años. Dado que nuestro sistema solar tiene 4500 millones de años y que la Vía Láctea se formó hace al menos 10.000 millones de años, las especies han dispuesto de tiempo más que suficiente para llegar a todos los mundos habitables.

Sin embargo, ambos investigadores examinaron la expansión de la vida desde puntos de vista distintos. Hart asumió un proceso de colonización «en persona», llevado a cabo por especies biológicas, mientras que Tipler imaginaba enjambres de sondas capaces de autorreplicarse saltando de estrella en estrella y expandiéndose sin restricciones. En la mayoría de los escenarios de colonización, los sistemas estelares y sus planetas pasan a estar habitados, si no lo estaban ya, y sirven como base de operaciones para saltar a otros sistemas. En el caso de las máquinas autorreplicantes de Tipler, la principal limitación a la expansión sería la disponibilidad de suficiente energía y materias primas para construir la siguiente generación.

Estos enfoques radicalmente distintos ponen de manifiesto la dificultad de realizar afirmaciones válidas sobre la migración interestelar. Siempre hay que hacer muchas suposiciones y, aunque algunas son razonables y fáciles de justificar, otras son más arriesgadas. Por ejemplo, todas las propuestas implican conjeturas sobre la naturaleza de la tecnología empleada en los viajes interestelares. Además, si la propia especie se embarca en el viaje espacial en vez de limitarse a enviar avanzados emisarios robóticos, la premisa fundamental es que los seres vivos pueden sobrevivir a cualquier tipo de travesía interestelar.

Sabemos que para alcanzar un mísero 10 por ciento de la velocidad de la luz se necesitaría una tecnología bastante extravagante, como un sistema de propulsión basado en bombas de fusión o colosales velas solares impulsadas por láseres [*véase* «Misión a Alfa Centauri», por Ann Finkbeiner; Investigación y Ciencia, mayo de 2017]. También haría falta un blindaje contra los impactos de los átomos del gas interestelar (que erosionarían el fuselaje) y de fragmentos de roca que podrían ser tan destructivos como bombas para una nave que se desplazara a una fracción sustancial de la velocidad de la luz. Viajar a velocidades más modestas sería más seguro, pero haría que los viajes entre estrellas durasen siglos o milenios, y no es evidente cómo mantener a la tripulación con vida y en buen estado durante lapsos de tiempo que podrían superar con creces la esperanza de vida individual.

Las premisas más polémicas, sin embargo, giran en torno a la motivación para viajar y a nuestras previsiones sobre la longevidad de civilizaciones enteras y sus asentamientos. Por ejemplo, si una especie extraterrestre simplemente no tiene interés en alcanzar otras estrellas, toda la idea de la colonización galáctica se viene abajo. Ese fue uno de los argumentos que emplearon Carl Sagan y William Newman en 1983 para refutar lo que llamaban el «enfoque solipsista» de la inteligencia extraterrestre. Pero, como apunta uno de mis colaboradores, el astrónomo Jason Wright, este tipo de afirmaciones pueden considerarse una «falacia monocultural». Dicho de otro modo: parece imposible especular de manera precisa sobre el comportamiento de toda una especie como si pensara con una mente única. Desde luego, los seres humanos no actuamos así. Y aun si la inmensa mayoría de las posibles civilizaciones viajeras de la Vía Láctea no emprendieran diásporas galácticas, bastaría con una sola cultura que fuera a contracorriente para esparcir señales de vida y tecnología a través de cientos de miles de millones de sistemas solares.

Extenderse por toda la galaxia no debería requerir mucho más que persistencia y una módica cantidad de tiempo cósmico

De hecho, a lo largo de los años se han producido infinidad de debates sobre las suposiciones en las que se basa la paradoja de Fermi. También se ha propuesto un amplio abanico de «soluciones» a esta paradoja, aunque no hay muchas (quizá ninguna) que se puedan verificar fácilmente. Si bien algunas de ellas plantean ideas bastante sencillas, otras son pura ciencia ficción. Por ejemplo, podría ser que el coste en recursos de surcar con rapidez el espacio interestelar fuera demasiado elevado, aun para una especie tecnológicamente muy avanzada. Eso sin duda reduciría el número de exploradores y explicaría el hecho A de Hart. O quizás el crecimiento demográfico no constituya una motivación suficiente para viajar a las estrellas —como han supuesto numerosos investigadores—, sobre todo para una especie capaz de reprimir sus instintos predatorios y sobrellevar una existencia verdaderamente sostenible en su sistema de origen. Una revolución verde definitiva eliminaría cualquier incentivo para ir más allá que no fuese la exploración científica.

Otras propuestas tienen un punto más siniestro, como la del gran filtro: la idea de que existe algún factor limitante —quizás un inevitable fracaso de esa revolución verde— que conduce de manera invariable a la extinción implosiva de cualquier forma de vida potencialmente tecnológica. O puede que los cataclismos naturales, desde explosiones de supernova hasta emanaciones del agujero negro central de la Vía Láctea, cercenen la vida galáctica con suficiente regularidad para evitar su expansión [*véase* «Explosiones cósmicas, la vida y el multiverso», por Raúl Jiménez; Investigación y Ciencia, diciembre de 2017].

Entre las ideas más estrafalarias figura la «hipótesis del zoológico», que sostiene que las potencias extraterrestres nos mantienen deliberadamente aislados y ajenos a su existencia. Y también está lo que suelo llamar el «escenario paranoico»: hay otras civilizaciones, pero se esconden unas de otras y se niegan a comunicarse debido a algún tipo de xenofobia cósmica.

Continúa en la página 28

Solos entre la multitud

De todas las posibles respuestas a la pregunta de por qué no hemos visto otras culturas cósmicas en la Vía Láctea, quizás la más plausible sea que existen pero no están en nuestras proximidades. Esa situación podría darse si la exploración y la migración interestelares tuvieran lugar en oleadas, con civilizaciones viajeras que se extienden periódicamente a los sistemas planetarios más cercanos y atractivos. Teniendo en cuenta los movimientos estelares y suponiendo que cada civilización existe durante un tiempo finito, las simulaciones de ese proceso producen agrupaciones de sistemas habitados de manera continuada y regiones aisladas y escasamente pobladas. Nuestro planeta bien podría encontrarse en una de estas últimas.

DIÁSPORAS GALÁCTICAS

Esta instantánea de una simulación ilustra 10 millones de años de exploración interestelar en 10.000 sistemas colonizables repartidos en una caja de unos 464 años luz de lado. (Los sistemas no aptos para el asentamiento son 22 veces más abundantes, pero no se muestran en la imagen). A esta escala, las estrellas se mueven como las partículas de un gas e impiden o facilitan los viajes interestelares según sus trayectorias. Las sondas creadas por las culturas diseminadas en este espacio virtual se mueven a 3000 kilómetros por segundo, es decir, 100 veces más rápido que la velocidad media de las estrellas circundantes, cuya distribución de densidad es similar a la de nuestra región galáctica.

● Cada punto representa la posición actual de un sistema planetario colonizado o colonizable.

Al concluir la simulación (*en la imagen*), 6948 de los sistemas habían sido visitados por una sonda, pero solo 403 albergaban asentamientos activos; 3052 sistemas colonizables no habían recibido ninguna visita. Esto generó 11 «imperios» interestelares, cada uno con al menos 10 sistemas colonizados y representado mediante un color que denota una ascendencia común.

Las oleadas que colonizaron un número menor de sistemas se muestran en gris.

Los colores más apagados indican sistemas que ya no albergan asentamientos activos. Los actualmente activos poseen burbujas semitransparentes con un radio de 10 años luz, que delimitan la hipotética esfera de influencia de cada sistema.

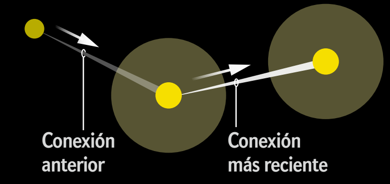
Ningún asentamiento activo en el último millón de años

El asentamiento acabó hace medio millón de años

Asentamiento actualmente activo

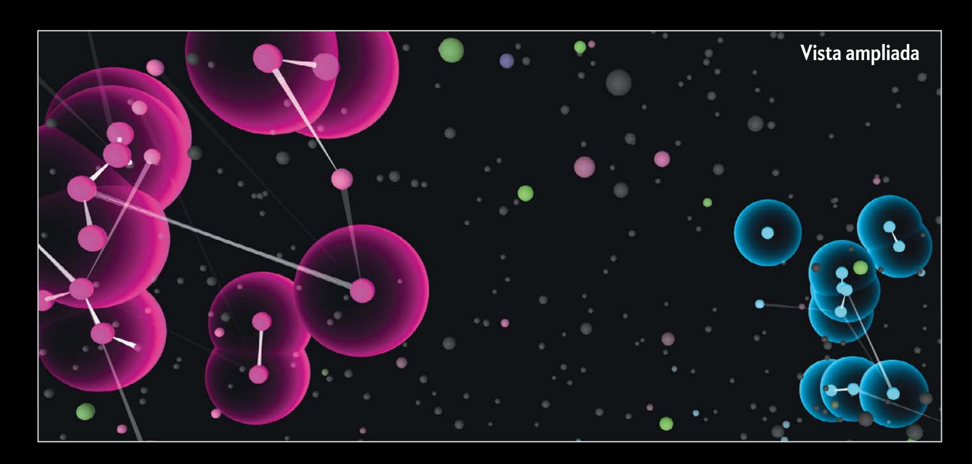
10 años luz

Los agentes solo seleccionaban sistemas colonizables situados en un radio de 10 años luz y que no estuvieran ocupados en ese momento ni fueran el objetivo de otros agentes. Las líneas representan expediciones interestelares exitosas y conectan los sistemas recién colonizados con sus progenitores. No son trayectorias reales, ya que las posiciones relativas de los sistemas cambian constantemente (aquí se muestran congeladas al final de la simulación).

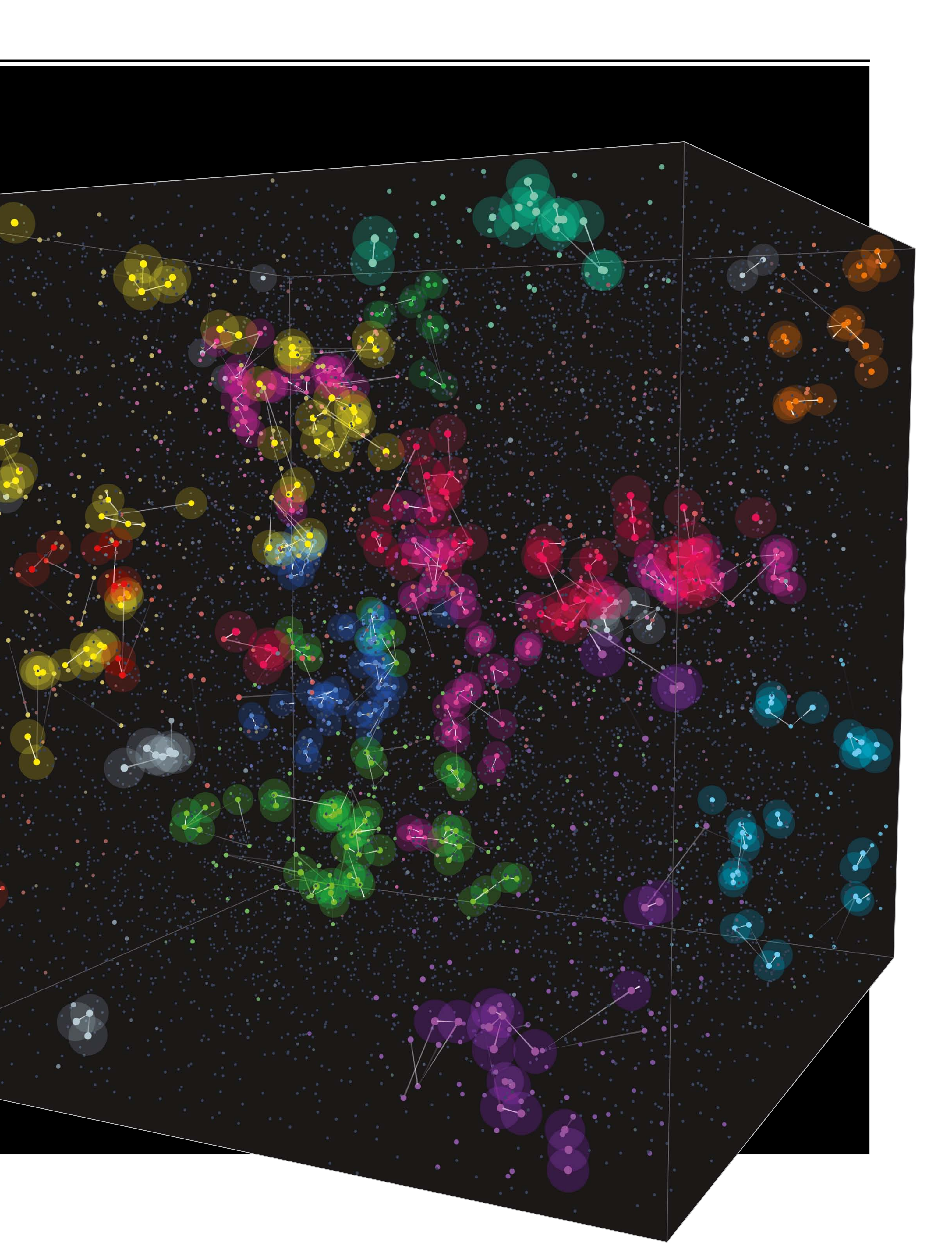


¿DÓNDE ESTÁ LA TIERRA?

Esta simulación es una aproximación grosera de nuestro vecindario galáctico. El sistema solar podría hallarse en cualquier región no colonizada de la caja. En estos vacíos transitorios, generados por fluctuaciones estadísticas en la trayectoria y la estructura planetaria de las estrellas vecinas, los mundos habitables quedarían fuera del alcance de las civilizaciones circundantes.



FUENTE: JONATHAN CARROLL-NELLENBACK, UNIVERSIDAD DE ROCHESTER; NADIEH BREMER (*gráfico*)



Viene de la página 25

Sin embargo, tal vez existan formas más simples de explicar que no tengamos noticias de los extraterrestres, las cuales podrían compartir ciertas características con el ejemplo que tenemos ante nuestros ojos: el carácter irregular y variable en el tiempo de la ocupación humana de las islas del Pacífico. Tanto en el caso terrestre como en el extraterrestre, entran en juego factores básicos y universales, desde la escasez de lugares adecuados donde echar el ancla hasta el tiempo que tardaría una población en prepararse para avanzar a través del vacío.

En 2015, mi colaborador Adam Frank, de la Universidad de Rochester, y yo comíamos cerca del campus de la Universidad de Columbia, en Nueva York. Igual que en el almuerzo en el que había tomado parte Fermi 65 años antes, la conversación giró en torno las posibles especies de viajeros espaciales. Inspirados por el cálculo mental improvisado de Fermi, tratamos de diseñar una estrategia de investigación que implicara el menor número posible de suposiciones infundadas y que pudiéramos verificar o acotar usando datos reales. Nos guiamos por la sencilla idea de que (como en el caso de los ocupantes temporales de la isla de Pitcairn) en la galaxia podrían tener lugar oleadas de exploración o colonización, y la aparición de los seres humanos podría haber coincidido con un período de calma.

En otras partes de la galaxia podrían existir archipiélagos de especies interestelares para quienes recibir visitantes cósmicos sea lo normal

Nuestra propuesta está relacionada con el hecho A de Hart (es decir, la observación de que actualmente no hay exploradores extraterrestres en la Tierra), pero va un paso más allá, puesto que nos preguntamos si podríamos imponer límites significativos sobre la vida galáctica acotando el período de tiempo exacto durante el que nuestro planeta no habría recibido ninguna visita. Tal vez los extraterrestres vinieron tiempo atrás y volvieron a irse. A lo largo de los años, algunos científicos han contemplado la posibilidad de buscar artefactos que pudieran haber abandonado esos visitantes de nuestro sistema solar. No es fácil determinar el alcance que debería tener una búsqueda exhaustiva, pero la situación se vuelve más manejable si nos circunscribimos a la Tierra. En 2018, otro de mis colaboradores, Gavin Schmidt, del Instituto Goddard de Estudios Espaciales de la NASA, realizó junto a Adam Frank un análisis crítico sobre las opciones reales de determinar si en el pasado existió otra civilización industrial en nuestro planeta.

Aunque la perspectiva pueda parecer fascinante, Schmidt y Frank sostienen —como la mayoría de los planetólogos— que es muy fácil que el tiempo borre cualquier indicio de vida tecnológica en la Tierra. Al cabo de un millón de años, las únicas pruebas reales se reducirían a anomalías estratigráficas isotópicas o químicas: elementos extraños como moléculas sintéticas, plásticos o lluvia radiactiva. Los restos fósiles y otros indicadores paleontológicos son tan escasos y dependen tanto de unas condiciones de formación específicas que, en este caso, podrían resultar irrelevantes.

De hecho, la urbanización humana actual solo cubre alrededor del 1 por ciento de la superficie terrestre, lo que supone un área de búsqueda muy reducida para los paleontólogos del futuro lejano. Schmidt y Frank también señalan que nadie ha llevado a cabo todavía los experimentos necesarios para buscar exhaustivamente esos indicios no naturales en la Tierra. En conclusión: si hubiera existido una civilización industrial de una escala similar a la nuestra hace unos pocos millones de años, es posible que no lo supiéramos. Lo cual, ciertamente, no quiere decir que en realidad existiera una. Solo indica que no se puede descartar esa posibilidad de manera rigurosa.

En los últimos años hemos tratado de examinar las implicaciones de estas ideas a escala galáctica, en una investigación dirigida por Jonathan Carroll-Nellenback, de la Universidad de Rochester, y Jason Wright, de la Universidad Estatal de Pensilvania. Un avance clave ha sido el desarrollo de una serie de simulaciones por ordenador basadas en agentes (sustentadas en las matemáticas tradicionales de lápiz y papel), que nos han permitido reflejar de forma más realista cómo podrían desplazarse las especies en el seno de una galaxia que está llena de movimiento.

Si nos fijamos solo en las estrellas situadas a menos de unos cientos de años luz del Sol, veremos que se mueven como las partículas de un gas. Una estrella puede desplazarse rápida o lentamente con respecto a un punto fijo de ese espacio, y lo hace en una dirección esencialmente aleatoria. Al abrir el plano hasta una escala de miles de años luz, comenzaríamos a apreciar el imponente movimiento orbital común que lleva a una estrella como el Sol a dar una vuelta alrededor del centro de la Vía Láctea cada 230 millones de años, aproximadamente. Las estrellas mucho más próximas al centro de la galaxia tardan mucho menos en completar un giro, y también hay veloces estrellas del halo que atraviesan el plano galáctico desde un enjambre esferoidal que envuelve el disco central.

Todo ello implica que las estrellas más próximas a una civilización que busque sistemas que explorar no son las mismas ahora que en el futuro. Nuestro propio sistema solar nos brinda un buen ejemplo. La estrella más cercana a la Tierra, Proxima Centauri, se encuentra actualmente a 4,24 años luz. Pero dentro de 10.000 años estará a tan solo 3,5 años luz, lo que reduciría notablemente la duración de un viaje interestelar. Sin embargo, si esperásemos 37.000 años a partir de hoy, durante un tiempo nuestra vecina más cercana sería una pequeña enana roja llamada Ross 248, que se acercará a apenas 3 años luz de nuestro planeta.

Para modelizar este mapa estelar cambiante, nuestra simulación emplea una caja tridimensional con estrellas que presentan movimientos similares a los que se producen en una región pequeña de una galaxia real. Entonces inicia un «frente» de colonización, designando una serie de estrellas como anfitrionas de civilizaciones de viajeros espaciales. Cada civilización posee un tiempo de vida finito, de modo que un sistema también puede pasar a estar deshabitado, y un período de espera antes de poder enviar una sonda o una misión de colonización a su estrella más próxima. Es posible modificar todos estos factores y jugar con ellos para observar cómo afectan al resultado. Para un amplio abanico de posibilidades, se produce un frente de colonización un tanto irregular que se autopropaga a través del espacio interestelar. La velocidad con que lo hace es la clave

para poner a prueba y confirmar posibles soluciones al problema original de Fermi.

Los resultados que se obtienen son a la vez simples y sutiles. El movimiento natural —similar al de un gas— de las estrellas implica que un frente de colonización sería capaz de atravesar la galaxia en mucho menos de 1000 millones de años, incluso con sondas interestelares que se desplazaran tan solo a unos 30 kilómetros por segundo (casi dos veces más rápido que los 17 kilómetros por segundo a los que la sonda Voyager 1 se aleja ahora mismo del Sol). Si incluimos otros movimientos estelares, como la rotación galáctica o el de las estrellas del halo, el tiempo necesario se reduce aún más. En otras palabras: tal y como observó Fermi, no es difícil llenar la galaxia de vida. Pero también es cierto que el grado exacto de ocupación depende tanto del número de planetas verdaderamente colonizables —lo que hemos denominado efecto Aurora, en homenaje a la épica novela de ciencia ficción homónima que Kim Stanley Robinson publicó en 2015— como de la cantidad de tiempo que las civilizaciones pueden subsistir en un mundo.

Yéndonos a un extremo, resulta fácil vaciar la galaxia simplemente reduciendo el número de planetas utilizables e imponiendo que las civilizaciones no duren demasiado, por ejemplo unos 100.000 años. En el otro extremo, es fácil ajustar estos factores para llenar el espacio de asentamientos activos de viajeros cósmicos. De hecho, si los mundos idóneos son lo bastante abundantes, apenas importa cuánto subsisten en promedio las civilizaciones que los colonizan. Mientras conserven la tecnología que les permite viajar, un número suficiente de ellas podría continuar explorando y acabar llenando la galaxia.

Sin embargo, las situaciones más interesantes y potencialmente realistas surgen entre esos dos extremos. Cuando la frecuencia con que se dan los mundos colonizables en una galaxia es entre alta y muy baja, pueden suceder cosas fascinantes. En concreto, las fluctuaciones estadísticas en el número y la ubicación de los mundos adecuados en una región del espacio galáctico pueden generar agrupaciones de sistemas que son visitados de manera continua o repoblados por una oleada tras otra de exploradores interestelares. Podemos visualizarlas como conjuntos de islas, o archipiélagos. La otra cara de la moneda es que tales agrupaciones suelen estar rodeadas de vastas regiones de espacio sin colonizar, lugares demasiado alejados y dispersos como para que merezca la pena emprender el viaje.

¿Puede este escenario del «archipiélago galáctico» explicar la situación de la Tierra? Sorprendentemente, podría hacerlo. Por ejemplo, si las civilizaciones planetarias típicas pueden subsistir un millón de años y solo el 3 por ciento de los sistemas estelares son colonizables, hay en torno a un 10 por ciento de probabilidades de que un planeta como la Tierra no haya sido visitado en el último millón de años. En otras palabras, no es terriblemente improbable que nos hallemos en el lado solitario de la ecuación.

A su vez, este mismo escenario implicaría que en otras partes de la galaxia existen grupos o archipiélagos de especies interestelares para quienes tener vecinos o visitantes cósmicos es lo normal. No hay que hacer ninguna hipótesis extrema para que ocurra todo esto: depende solo de consideraciones bastante corrientes sobre el número de planetas y la naturaleza de los movimientos estelares en la Vía Láctea. Y aunque es cierto que persisten las suposiciones relativas a la viabilidad de los viajes interestelares y a la probabilidad de que una especie decida emprenderlos, el resto de factores son solo parámetros que hay que ajustar. Algunos de ellos, como el número de mundos habitables, ya están en el punto de mira de los astrónomos que investigan los exoplanetas. Otros, como la longevidad de las civilizaciones, son objeto de intenso escrutinio mientras abordamos nuestros propios problemas de sostenibilidad planetaria.

También existe la posibilidad de que descubramos indicios de archipiélagos estelares poblados o del progresivo avance de un frente de colonización. Una nueva e interesante estrategia en la búsqueda de inteligencia y tecnología extraterrestres podría consistir en centrarnos en regiones galácticas cuya topografía estelar pudiera facilitar el agrupamiento y la expansión interestelar, en vez de en exoplanetas individuales. Hasta hace poco, nuestro mapa tridimensional del espacio galáctico era sumamente limitado, pero gracias a instrumentos como el observatorio Gaia, de la Agencia Espacial Europea, que ya ha cartografiado más de mil millones de objetos astronómicos y movimientos estelares, podríamos ser capaces de localizar esas regiones [*véase* «El primer mapa 3D de la Vía Láctea», por Carme Jordi y Eduard Masana; Investigación y Ciencia, marzo de 2019].

Pero, en el fondo, lo verdaderamente paradójico de la paradoja de Fermi podría ser que no entrañe ninguna paradoja. El trabajo de mis compañeros demuestra que el hecho de que un mundo habitable y poblado como la Tierra no muestre indicios perceptibles de haber sido visitado o colonizado por especies extraterrestres es algo completamente natural. Y esa conclusión es válida tanto si la galaxia carece de otras formas de vida tecnológicamente avanzadas como si está repleta de exploradores interestelares. Así como Pitcairn podría haber pasado más de tres siglos deshabitada en el océano Pacífico, la Tierra podría estar atravesando un período de aislamiento antes de recibir la siguiente oleada cósmica de vida pangaláctica.

La verdadera pregunta, la misma que podrían haberse hecho los colonizadores polinesios a lo largo de los siglos, es si nuestra civilización planetaria todavía existirá cuando eso ocurra. IyC

PARA SABER MÁS

Interstellar migration and the human experience. Editado por Ben R. Finney y Eric M. Jones. University of California Press, 1985.

The great silence: Science and philosophy of Fermi's paradox. Milan M. Ćirković. Oxford University Press, 2018.

The Fermi paradox and the Aurora effect: Exo-civilization settlement, expansion, and steady states. Jonathan Carroll-Nellenback et al. en *The Astronomical Journal*, vol. 158, n.º 3, art. 117, agosto de 2019.

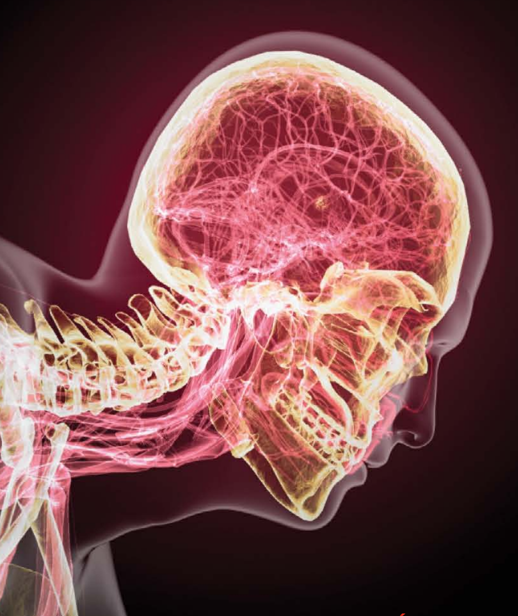
EN NUESTRO ARCHIVO

¿Dónde están? Ian Crawford en *IyC*, septiembre de 2000.

La humanidad en el espacio. Cameron M. Smith en *IyC*, marzo de 2013.

Solos en la Vía Láctea. John Gribbin en *IyC*, noviembre de 2018.





EVOLUCIÓN

¿POR QUÉ NECESITA EL CEREBRO QUE HAGAMOS EJERCICIO?

Puede que algunas transiciones fundamentales de nuestra historia evolutiva hayan conectado cuerpo y mente de unas formas que podemos utilizar para ralentizar el envejecimiento del cerebro

David A. Raichlen y Gene E. Alexander

Ilustración de Bryan Christie Design

David A. Raichlen es profesor de ciencias biológicas y director del laboratorio de biología evolutiva del ejercicio en la Universidad del Sur de California. Su investigación se centra en la biomecánica y la fisiología del ejercicio desde una perspectiva evolutiva.

Gene E. Alexander es profesor de psicología y psiquiatría y director del laboratorio de estudios de neuroimagen, comportamiento y envejecimiento de la Universidad de Arizona. Estudia el envejecimiento del cerebro tanto en adultos sanos como en aquellos que sufren alguna enfermedad neurodegenerativa.

Durante la década de 1990, los investigadores anunciaron una serie de descubrimientos que contradecían uno de los pilares de la neurociencia. Durante decenios, se había creído que era imposible que en el cerebro maduro crecieran neuronas nuevas. Al llegar a la edad adulta, este empezaba a perder neuronas en lugar de crear más. Sin embargo, cada vez aparecían más pruebas de que sí podía generarlas. En un experimento especialmente sorprendente realizado con ratones, unos científicos descubrieron que el simple hecho de correr sobre una rueda provocaba el nacimiento de neuronas en el hipocampo, una estructura asociada a la memoria. Desde entonces, otros estudios han demostrado que la actividad física también ejerce efectos positivos en el cerebro humano, sobre todo a medida que envejecemos, y que incluso puede ayudar a reducir el riesgo de padecer alguna enfermedad neurodegenerativa, como el alzhéimer. Pero la investigación planteó una pregunta fundamental: ¿por qué el ejercicio afecta al cerebro?

La actividad física mejora el funcionamiento de numerosos órganos, pero los efectos suelen estar relacionados con una mejoría de la condición física. Por ejemplo, cuando caminamos o corremos, nuestros músculos necesitan más oxígeno y, con el tiempo, nuestro sistema cardiovascular responde aumentando el tamaño del corazón y fabricando nuevos vasos sanguíneos. Los cambios cardiovasculares son principalmente una respuesta al esfuerzo físico asociado al ejercicio, el cual puede, a su vez, mejorar la resistencia. ¿Pero qué tipo de esfuerzo puede provocar una respuesta del cerebro?

Para responder a esta cuestión es necesario que nos replanteemos la idea que tenemos del ejercicio. La gente suele pensar que caminar y correr son actividades que el cuerpo puede realizar en modo «piloto automático». Pero la investigación llevada a cabo durante la última década, tanto por nosotros como por otros equipos, parece demostrar que esta creencia popular es errónea. En lugar de ello, el ejercicio conllevaría no solo un trabajo físico, sino también cognitivo. De hecho, el vínculo existente entre la actividad física y la salud mental se remonta hasta los orígenes de los rasgos distintivos de la

EN SÍNTESIS

Actualmente, es bien sabido que el ejercicio tiene efectos positivos sobre el cerebro, especialmente a medida que envejecemos. No obstante, hasta hace poco no había una explicación clara para ello.

Sucesos fundamentales de la historia evolutiva de los humanos pueden haber forjado una conexión entre la actividad física y la función cerebral.

Los ejercicios físicos que son cognitivamente exigentes pueden resultar más beneficiosos para el cerebro que aquellos que requieren un menor esfuerzo cognitivo.

EJERCICIO Y NEUROGÉNESIS

Neuronas nuevas en cerebros que envejecen

El ejercicio conlleva cambios beneficiosos en el cerebro adulto, como la formación de nuevas neuronas y más conexiones entre las neuronas existentes. Una de las formas en las que parece que la actividad física induce esta neuroplasticidad es mediante el incremento de la producción de una proteína llamada factor neurotrófico derivado del cerebro (BDNF, por sus siglas en inglés), que fomenta el crecimiento y la supervivencia neuronales. La investigación reciente sugiere que hacer participar al cerebro en tareas cognitivas durante la actividad física refuerza este proceso.

Hipocampo

Célula madre

Las células madre dan lugar a células destinadas a convertirse en nuevas neuronas

Neurona incipiente

La nueva célula migra y se transforma en una nueva neurona inmadura

La nueva neurona se activa y se conecta con una red de aprendizaje

El ejercicio cognitivamente exigente puede aumentar la neuroplasticidad al hacer funcionar las vías fisiológicas existentes entre el cuerpo y el cerebro heredadas de nuestros antepasados cazadores-recolectores, quienes tenían que realizar diversas tareas simultáneas para encontrar alimento.

Memoria espacial y orientación

Sistema y control motores

Función ejecutiva (decisiones y planificación)

BDNF

Sistemas sensoriales y de alerta

TAMI TOLPA

Erguidos y en marcha

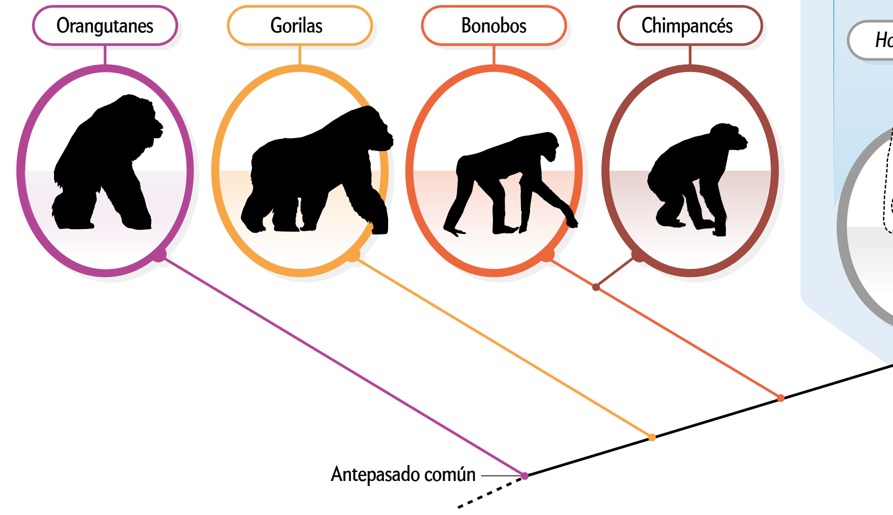
En el tiempo transcurrido desde que el linaje humano se separó del de los chimpancés y los bonobos, hace entre seis y siete millones de años, nuestra especie ha desarrollado toda una serie de rasgos que nos diferencian de los demás simios. Los efectos beneficiosos en el cerebro del ejercicio cognitivamente exigente pueden deberse a dos cambios evolutivos: el desplazamiento erguido y la caza y la recolección como estrategia de supervivencia. Esos cambios nos hicieron más activos físicamente que nuestros primos simios y facilitaron la aparición de nuestra capacidad para realizar tareas simultáneas.

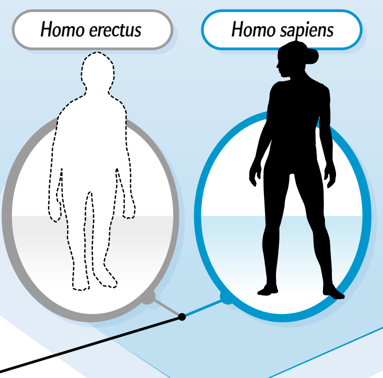
Bipedismo

Hace entre seis y siete millones de años, los antepasados de los humanos dejaron de caminar sobre las cuatro extremidades para hacerlo de pie sobre las extremidades traseras, como nosotros. El cambio de una locomoción cuadrúpeda a una bípeda introdujo retos relacionados con el equilibrio que habrían supuesto nuevas exigencias para el cerebro.

Cazar y recolectar

Hace unos dos millones de años, nuestros antepasados empezaron a buscar alimento de una nueva forma, cazando animales y recolectando alimentos vegetales. Esta estrategia implica una mayor actividad aeróbica que la observada en otros simios, que subsisten principalmente a base de plantas. Y requiere que el cerebro lleve a cabo una serie de tareas cognitivas mientras el individuo se desplaza.





humanidad, hace millones de años. Si podemos comprender mejor por qué y cómo el ejercicio activa el cerebro, tal vez logremos utilizar las vías fisiológicas pertinentes para diseñar nuevas rutinas de ejercicios que estimulen la cognición de las personas a medida que envejecen, un objetivo en el que ya estamos trabajando.

FLEXIONES CEREBRALES

Para averiguar por qué el ejercicio beneficia al cerebro, primero hemos de tener en cuenta qué aspectos estructurales y cognitivos son más sensibles a la actividad física. En la década de 1990, investigadores del Instituto Salk de Estudios Biológicos en La Jolla, California, dirigidos por Fred Gage y Henriette Van Praag demostraron que, en los ratones, correr aumenta el nacimiento de neuronas en el hipocampo, y observaron que este proceso parecía ir unido a la producción de una proteína llamada factor neurotrófico derivado del cerebro (BDNF, por sus siglas en inglés). La proteína, que se produce en todo el cuerpo y en el cerebro, fomenta el crecimiento y la supervivencia de las neuronas nuevas. El siguiente paso que dieron el grupo de Salk y otros fue demostrar que la neurogénesis inducida por el ejercicio en los roedores guarda relación con un mejor desempeño en las tareas asociadas a la memoria. Los resultados de estos estudios fueron sorprendentes, porque la atrofia del hipocampo suele vincularse con problemas de memoria durante el envejecimiento de las personas sanas y, en un grado mucho mayor, en las que padecen enfermedades neurodegenerativas como el alzhéimer. Los hallazgos de los experimentos con roedores proporcionaron un primer atisbo de cómo el ejercicio podría contrarrestar este deterioro.

Después de esos trabajos con animales, los investigadores llevaron a cabo una serie de experimentos que determinaron que, en los humanos, igual que sucede en los roedores, el ejercicio aeróbico induce la producción de BDNF y aumenta la estructura (es decir, el tamaño y la conectividad) de algunas áreas fundamentales del cerebro, entre ellas el hipocampo. En un ensayo aleatorizado con adultos de edad avanzada, Kirk Erickson y Arthur Kramer, de la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign, observaron que 12 meses de ejercicio aeróbico daban lugar a un aumento de los niveles de BDNF, un mayor tamaño del hipocampo y una mejoría de la memoria.

Otros investigadores han descubierto asociaciones entre el ejercicio y el hipocampo gracias a toda una serie de trabajos observacionales. En nuestro propio estudio con más de 7000 personas del Reino Unido de edad mediana y avanzada, publicado en 2019 en *Brain Imaging and Behavior*, demostramos que las personas que pasaban más tiempo practicando ejercicio de moderado a enérgico poseían un hipocampo más voluminoso. Aunque todavía no es posible saber si estos efectos están relacionados con la neurogénesis u otras formas de plasticidad cerebral (como un incremento de las conexiones entre las neuronas ya existentes), los resultados indican claramente que el ejercicio puede ser beneficioso para el hipocampo y para sus funciones cognitivas.

TAMI TOLPA

También se han hallado vínculos claros entre el ejercicio aeróbico y mejorías en otras partes del cerebro, incluida una expansión de la corteza prefrontal. Se ha relacionado el aumento de esa región con una agudización de las funciones cognitivas ejecutivas, las cuales tienen que ver con la planificación, la toma de decisiones y la realización de múltiples tareas simultáneas. Tales habilidades, al igual que la memoria, suelen reducirse con el envejecimiento normal y empeoran aún más si se sufre alzhéimer. Los científicos sospechan que el aumento de las conexiones entre las neuronas existentes, más que la formación de otras nuevas, es el responsable de los efectos beneficiosos del ejercicio sobre la corteza prefrontal y otras regiones del cerebro distintas del hipocampo.

DE PIE Y ACTIVOS

Dado que cada vez más pruebas indicaban que el ejercicio aeróbico mejoraba la salud mental, sobre todo en adultos de edad avanzada, el siguiente paso consistía en averiguar cuáles de las tareas cognitivas asociadas a la actividad física desencadenaban esta respuesta adaptativa. Pensamos que un buen punto de partida sería examinar la relación evolutiva entre el cerebro y el cuerpo. Los homininos (el grupo al que pertenecemos los humanos modernos y nuestros parientes extintos más próximos) se separaron del linaje que dio origen, hace entre seis y siete millones de años, a nuestros antepasados vivos más cercanos: los chimpancés y los bonobos. En esa época, los homininos desarrollamos una serie de adaptaciones anatómicas y conductuales que nos distinguen de los demás primates. Creemos que dos de esos cambios evolutivos conectaron el ejercicio con la función cerebral de una forma que nos resulta útil hoy en día.

Primero, nuestros antepasados pasaron de caminar sobre las cuatro extremidades a hacerlo de pie, únicamente sobre las traseras [*véase* «Nuevas pistas sobre el origen del bipedismo», por Tracy L. Kivell, *en este mismo número*]. La postura bípeda implica que a veces nuestro cuerpo mantiene un equilibrio precario sobre uno de los pies en lugar de sobre dos o más extremidades, como ocurre con otros simios. Para cumplir con esta tarea, nuestro cerebro debe coordinar una gran cantidad de información y, al mismo tiempo, realizar ajustes de la actividad muscular en todo el cuerpo para mantener el equilibrio. Mientras coordinamos estas acciones, debemos también estar atentos a los posibles obstáculos en el entorno. En otras palabras, simplemente porque somos bípedos, nuestro cerebro tiene que enfrentarse a más exigencias cognitivas que nuestros antepasados cuadrúpedos.

Segundo, la forma de vida hominina cambió para integrar niveles más altos de actividad aeróbica. Las pruebas fósiles indican que, en las primeras etapas de la evolución humana, nuestros antepasados eran, probablemente, simios bípedos bastante sedentarios que se alimentaban sobre todo de plantas. Sin embargo, hará unos dos millones de años, a medida que los hábitats se secaron debido al enfriamiento del clima, al menos un grupo de humanos ancestrales empezó a buscar sustento de una nueva forma: cazaban animales y recogían alimentos de origen vegetal. La caza y la recolección fueron las estrategias de subsistencia humanas predominantes durante casi dos millones de años, hasta la llegada de la agricultura y del pastoreo hará unos 10.000 años. Herman Pontzer, de la Universidad Duke, Brian Wood, de la Universidad de California en Los Ángeles, y nosotros mismos hemos demostrado que, debido a las largas travesías en busca de alimento, la caza y la recolección requerían una mayor actividad aeróbica que la observada en otros simios.

Este modo de vida mucho más activo físicamente vino acompañado de una mayor exigencia para el cerebro. Cuando se desplazan largas distancias en busca de alimento, los cazadores-recolectores deben evaluar su entorno para asegurarse de que saben dónde están. Esta clase de orientación espacial depende del hipocampo, la misma región cerebral que se beneficia del ejercicio y que tiende a atrofiarse a medida que envejecemos. También tienen que escudriñar el paisaje para localizar indicios de la presencia de alimento a partir de la información sensorial que le aportan los sistemas visual y auditivo. Además, tienen que recordar dónde han estado antes y cuándo estaban disponibles ciertas clases de alimento, para lo cual el cerebro recurre a la memoria a corto plazo y a largo plazo. Ello permite a las personas tomar decisiones y planear sus itinerarios, tareas cognitivas en las que participan el hipocampo y la corteza prefrontal, además de otras regiones. Los cazadores-recolectores también buscan alimentos en grupo, en cuyo caso deben mantener conversaciones entre ellos al mismo tiempo que su cerebro los mantiene erguidos en equilibrio y situados espacialmente en el entorno. Todas estas tareas están controladas, en parte, por la corteza prefrontal, la cual también tiende a ir reduciéndose con la edad.

Aunque cualquier animal recolector debe recorrer largas distancias y averiguar dónde encontrar alimento, los cazadores-recolectores tienen que llevar a cabo estas funciones durante rápidas caminatas que se pueden extender más de 20 kilómetros. A velocidades altas, realizar múltiples tareas simultáneas es cada vez más difícil y requiere que el procesamiento de la información sea más rápido. Desde una perspectiva evolutiva, tendría sentido poseer un cerebro preparado para responder a toda una serie de demandas, durante y después de la recolección, para maximizar las posibilidades de conseguir alimento. Pero los recursos fisiológicos requeridos para construir y mantener un cerebro de ese tipo, incluidos los necesarios para el nacimiento y la supervivencia de nuevas neuronas, consumen energía. Ello significa que, si no utilizamos este sistema con cierta regularidad, tal vez perdamos las ventajas asociadas a él.

Esta perspectiva adoptada por la neurociencia evolutiva sobre el ejercicio y el cerebro, que analizamos detalladamente en un artículo publicado en 2017 en *Trends in Neurosciences*, tiene profundas implicaciones para los humanos actuales. En nuestra sociedad moderna, encontrar alimento para sobrevivir no nos supone ningún esfuerzo físico aeróbico. La atrofia del cerebro y el declive cognitivo que suelen aparecer durante el envejecimiento pueden estar relacionados, en parte, con nuestros hábitos sedentarios.

Pero con solo entrenar más tal vez no logremos todo el potencial que puede ofrecernos la actividad física para mantener el deterioro cerebral a raya. De hecho, nuestro modelo sugiere que incluso las personas que ya realizan mucho ejercicio aeróbico igual deberían replantearse sus rutinas. Quizá no siempre nos ejercitemos de una forma que aproveche todas las ventajas de los mecanismos que evolucionaron para mantener el funcionamiento del cerebro.

Pensemos en cómo practicamos ejercicio muchos de nosotros. A menudo, vamos a gimnasios y utilizamos aparatos estáticos; la tarea cognitiva más exigente cuando los empleamos consiste en decidir qué canal mirar en la pantalla de televisión integrada en ellos. Además, estas máquinas eliminan algunas de las exigencias derivadas de tener que mantener el equilibrio y ajustar la velocidad, aparte de otras competencias cognitivas intrínsecas que se necesitan para moverse en un entorno cambiante.

¿Y si esta forma de realizar ejercicio no nos ofrece todos los beneficios que podríamos obtener? Nuestros antepasados evolucionaron en un mundo impredecible. ¿Y si modificáramos nuestras rutinas de ejercicios para incluir tareas cognitivas como aquellas a las que se enfrentaban nuestros antepasados cazadores-recolectores? Si potenciáramos los efectos del ejercicio mediante la incorporación de una actividad cognitivamente exigente, quizá podríamos aumentar la eficacia de los programas de ejercicios que pretenden estimular las capacidades mentales de los ancianos, e incluso podríamos alterar el curso de enfermedades neurodegenerativas como el alzhéimer.

MOVÁMONOS Y PENSEMOS

De hecho, cada vez más investigadores creen que un ejercicio que estimule la cognición beneficiará más al cerebro que uno que no comporte exigencias cognitivas. Gerd Kempermann y sus colaboradores del Centro de Terapias Regenerativas de Dresde estudiaron esta posibilidad comparando el crecimiento y la supervivencia de neuronas nuevas en el hipocampo de dos grupos de ratones: unos habían hecho ejercicio sin más y los otros lo habían hecho en un ambiente cognitivamente desafiante. Descubrieron un efecto acumulativo: el ejercicio por sí solo era bueno para el hipocampo, pero, al combinarlo con tareas cognitivas en un entorno estimulante, el resultado era incluso mejor y daba lugar a más neuronas nuevas. Utilizar el cerebro durante y después del ejercicio parecía desencadenar una mejoría en la supervivencia neuronal.

Hace poco, nosotros y otros científicos hemos empezado a extender estos estudios con animales a los humanos y hemos obtenido unos resultados alentadores. Algunos investigadores han examinado una combinación de ejercicio y tareas mentales en individuos que experimentaban un importante deterioro cognitivo. Cay Anderson-Hanley, del Union College en Schenectady, Nueva York, ha evaluado el efecto de realizar simultáneamente ejercicios físicos y mentales en personas con un deterioro cognitivo leve, asociado a un riesgo alto de padecer alzhéimer. Se necesitan más trabajos con poblaciones como estas antes de poder extraer conclusiones claras, pero, hasta ahora, los resultados indican que las personas que ya están sufriendo alguna alteración cognitiva podrían mejorar si practicaran ejercicio físico y a la vez jugaran a un videojuego exigente mentalmente. En estudios realizados con adultos sanos, Anderson-Hanley y sus colaboradores también han demostrado que la combinación de ambas tareas puede llevar a un mayor aumento de BDNF circulante que si el individuo solo se ejercita físicamente. Estos hallazgos refuerzan aún más la idea de que la BDNF es fundamental para lograr los beneficios mentales inducidos por el ejercicio.

En nuestro propio trabajo, hemos desarrollado un juego diseñado específicamente para estimular aquellos aspectos de la cognición que suelen deteriorarse con la edad y que probablemente necesitábamos cuando éramos recolectores. En el juego, los participantes se desplazan y realizan labores de atención y memoria mientras van en bicicleta con un nivel de intensidad aeróbica moderada. Para evaluar el potencial de este enfoque a la hora de aumentar el rendimiento cognitivo en adultos sanos de edad avanzada, hemos comparado cuatro grupos de personas: las del primero se ejercitan mientras participan en el juego; las del segundo hacen ejercicio sin jugar; las del tercero juegan sin hacer ejercicio; y las del cuarto, el grupo de control, se limitan a ver vídeos sobre la naturaleza. Hasta ahora, los resultados son prometedores.

Hay numerosos equipos de investigadores que están examinando combinaciones de ejercicios y tareas cognitivas. En un futuro cercano, es muy posible que entendamos mejor cómo utilizarlos para mantener y promover la cognición tanto en individuos sanos como en aquellos que sufren un deterioro cognitivo asociado a alguna enfermedad.

Además de las intervenciones diseñadas especialmente similares a las que acabamos de describir, la práctica de deportes que requieran la combinación de ejercicios cognitivos y aeróbicos tal vez sea una forma de promover los beneficios en el cerebro. Hace poco hemos demostrado que los corredores universitarios de campo a través que entrenan mayormente al aire libre presentan una mayor conectividad entre las regiones cerebrales asociadas a las funciones cognitivas ejecutivas que los adultos jóvenes sanos pero más sedentarios. Las futuras investigaciones nos ayudarán a comprender si tal mejora también es superior a la observada en los corredores que entrenan en entornos menos complejos, como en una cinta.

Queda mucho por descubrir. Aunque todavía es demasiado pronto para poder hacer propuestas específicas que combinen ejercicio y tareas cognitivas, podemos decir con certeza que la actividad física es un actor fundamental a la hora de conservar la función cerebral a medida que envejecemos. El Departamento de Salud y Servicios Sociales de Estados Unidos aconseja practicar ejercicio aeróbico al menos durante 150 minutos por semana a una intensidad moderada, o 75 minutos por semana a una intensidad elevada (o una combinación equivalente de ambas posibilidades). Alcanzar o superar estas recomendaciones es bueno para el cuerpo y puede mejorar la salud mental.

Los ensayos clínicos nos dirán mucho más sobre la eficacia de practicar ejercicio junto con tareas cognitivas. Nos ayudarán a determinar qué tipos de actividad mental y física tienen más impacto, o cuáles son la intensidad y la duración óptimas del ejercicio para aumentar la cognición. Pero, a la luz de las pruebas de las que disponemos hoy, creemos que con una investigación meticulosa y continuada llegaremos a conocer las vías fisiológicas que conectan el cerebro y el cuerpo. De esta manera, durante el envejecimiento, podremos aprovechar la capacidad adaptativa desarrollada por nuestro cerebro para mejorar con el entrenamiento físico. Al final, activar tanto el cuerpo como el cerebro durante el ejercicio puede ayudarnos a mantener la mente en buen estado durante toda la vida. IyC

PARA SABER MÁS

Exercise, APOE genotype, and the evolution of the human lifespan. David A. Raichlen y Gene E. Alexander en *Trends in Neurosciences,* vol. 37, n.º 5, págs. 247-255, mayo de 2014.

Adaptive capacity: an evolutionary neuroscience model linking exercise, cognition, and brain health. David A. Raichlen y Gene E. Alexander en *Trends in Neurosciences,* vol. 40, n.º 7, págs. 408-421, julio de 2017.

Differential associations of engagement in physical activity and estimated cardiorespiratory fitness with brain volume in middle-aged to older adults. David A. Raichlen et al. en *Brain Imaging and Behavior.* Publicado online el 17 de junio de 2019. **https://doi.org/10.1007/s11682-019-00148-x**

EN NUESTRO ARCHIVO

Ejercicio físico y estimulación cognitiva contra el alzhéimer. María Llorens-Martín, Almudena Fuster Matanzo y Jesús Avila en *MyC* n.º 63, 2013.

Efectos del deporte en el cerebro. Ulrich Pontes en *MyC* n.º 78, 2016.

Actividad física: una necesidad fisiológica. Herman Pontzer en *IyC*, marzo de 2019.



FÍSICA CUÁNTICA

Una nueva versión de un célebre experimento modifica nuestra visión de la física fundamental y sugiere una estrategia alternativa para la computación cuántica

EL EXPERIMENTO DE LA TRIPLE RENDIJA

Urbasi Sinha

Ilustración de Andrea Ucini

El premio nóbel Richard Feynman afirmaba que el experimento de la doble rendija encierra «todo el misterio de la mecánica cuántica». Propuesto en 1801 por el erudito inglés Thomas Young, este experimento consiste en enviar un haz de fotones (partículas de luz) contra una placa con

EN SÍNTESIS

El experimento de la doble rendija puso de manifiesto que la luz y la materia son tanto ondas como partículas y demostró el principio de superposición, que implica que las partículas pueden encontrarse en diversos estados al mismo tiempo.

Recientemente, los científicos han llevado a cabo este experimento con tres rendijas en lugar de dos. La modificación ha revelado nuevos detalles acerca de cómo debe calcularse la superposición en las condiciones propias de estos experimentos.

El experimento de la triple rendija también puede ser útil para la computación cuántica. Ofrece la oportunidad de crear bits cuánticos con tres dimensiones (en vez de las dos habituales), lo que podría servir para aumentar el tamaño de los ordenadores cuánticos.

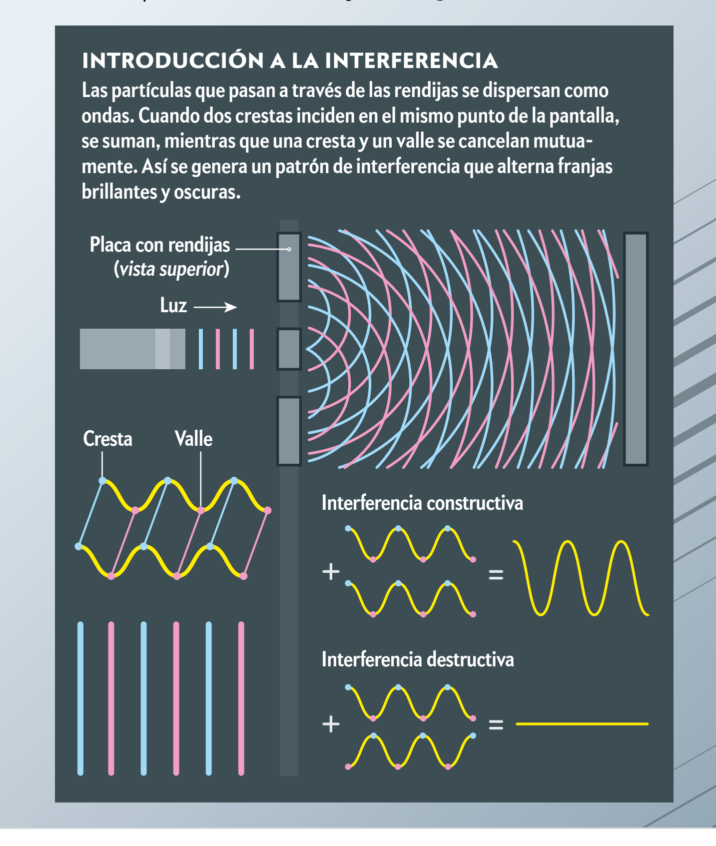


Urbasi Sinha es física en el Instituto de Investigación Raman de Bangalore, y está asociada al Instituto de Computación Cuántica de la Universidad de Waterloo, en Ontario, y al Centro de Información Cuántica y Control Cuántico de la Universidad de Toronto. Su investigación se centra en los aspectos experimentales de la información y computación cuánticas.

SUPERPOSICIÓN

Experimentos con rendijas

El famoso experimento de la doble rendija estableció dos de los principios fundamentales de la teoría cuántica: la dualidad onda-corpúsculo (la idea de que la materia y la luz son tanto partículas como ondas) y el principio de superposición, según el cual las partículas pueden estar en diversos estados y lugares al mismo tiempo. Recientemente, los científicos han repetido este experimento con tres rendijas en vez de dos, lo que abre la puerta a nuevas posibilidades teóricas y tecnológicas.



NICK BOCKELMAN

dos rendijas. Al alcanzar una pantalla situada tras la placa, la luz produce un patrón de interferencia característico: bandas luminosas intercaladas con otras oscuras. Este patrón solo puede aparecer si los fotones presentan un comportamiento ondulatorio, de modo que las crestas y los valles de las ondas procedentes de cada rendija interfieran entre sí, sumándose en algunos puntos de la pantalla y cancelándose en otros. Al llevar a cabo este experimento (con un diseño diferente), Young aparentemente demostró que la luz era una onda y no una partícula.

¿O no lo hizo? Siglos más tarde, los científicos realizaron experimentos similares donde los fotones se emitían uno a uno. Extrañamente, el patrón de interferencia seguía apareciendo, como si cada partícula fuese capaz de interferir consigo misma. Y lo que es aún más raro: si usamos un detector para determinar por qué rendija pasa cada fotón, el patrón de interferencia desaparece y sobre la pantalla se obtienen dos líneas luminosas, como cabría esperar si fueran partículas y no ondas las que estuvieran atravesando las rendijas. Es como si el acto de medir cambiase la naturaleza de las partículas.

Pese a su simplicidad, el experimento de la doble rendija sigue siendo uno de los más fascinantes jamás realizados. Se ha repetido muchas veces, tanto con partículas de luz como de materia, y demuestra la naturaleza fundamentalmente extraña de la mecánica cuántica: la luz y la materia son tanto partículas como ondas, un concepto que se conoce como dualidad onda-corpúsculo. El experimento también pone de manifiesto el principio de superposición, según el cual las partículas pueden hallarse en diversos estados e incluso en diferentes lugares a la vez. En el caso que nos ocupa, las partículas no pueden haber pasado a través de una rendija o la otra: para que se produzca la interferencia, tienen que viajar a través de ambas.

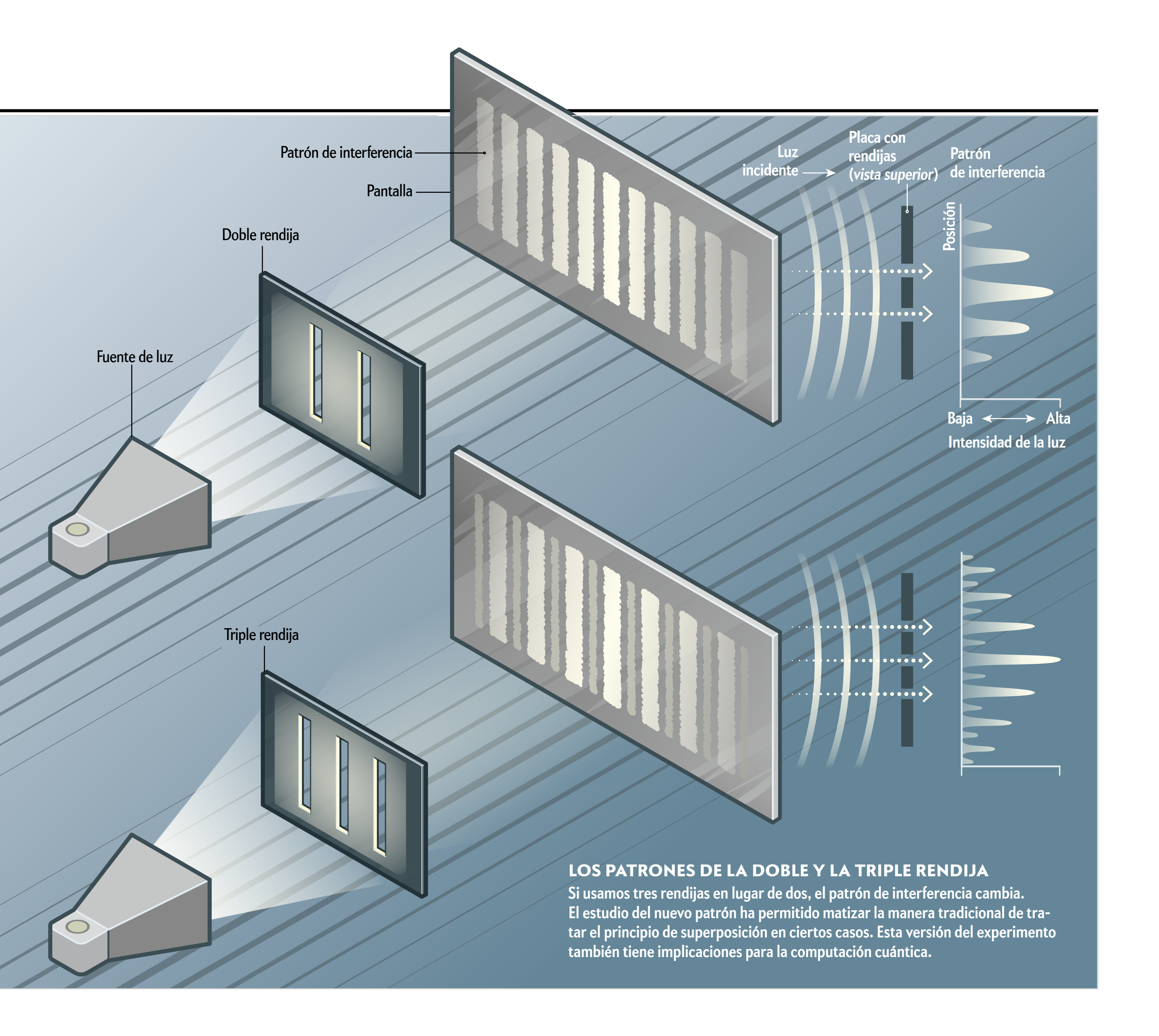
Pese a lo célebre de este experimento, aún no hemos desvelado todos sus secretos. Mi equipo en el Laboratorio de Información y Computación Cuántica del Instituto de Investigación Raman de Bangalore, en la India, ha realizado recientemente experimentos de «triple rendija» (con tres rendijas en vez de dos) con microondas. Aunque parezca una modificación muy simple, tiene profundas repercusiones. En el plano teórico, nuestro experimento de la triple rendija ha aclarado cómo debe calcularse la superposición en tales circunstancias, revelando nuevas sutilezas en nuestra comprensión de este fenómeno.

La configuración del experimento de la triple rendija también ofrece oportunidades en el campo de la computación cuántica. Los ordenadores cuánticos prometen ser capaces de realizar cálculos hasta ahora inabordables, siempre que logremos aprovechar las posibilidades que nos brinda la física cuántica para construirlos. Uno de los principales retos de la computación cuántica es encontrar un modo de aumentar el número de bits de los ordenadores cuánticos —los llamados qubits— sin destruir la superposición que permite que dichos qubits se encuentren en dos estados a la vez (y que es la clave para aumentar enormemente la velocidad de cálculo). Mientras gran parte de la comunidad persigue este objetivo, mi laboratorio ha adoptado un enfoque alternativo que aún no ha recibido tanta atención: usar «qudits» con d dimensiones en lugar de los qubits bidimensionales. A partir del experimento de la triple rendija podemos crear qudits tridimensionales, conocidos como «qutrits».

EL PRINCIPIO DE SUPERPOSICIÓN

La teoría cuántica no solo describe las partículas fundamentales como ondas físicas, sino que también establece que están determinadas por la llamada ecuación de ondas. Sus soluciones, que podemos denotar con la letra griega psi (ψ), representan la amplitud de probabilidad de que la partícula se encuentre en un estado concreto.

Sin embargo, nuestras investigaciones han revelado un problema con la forma habitual en que los físicos aplican la ecuación de ondas al experimento de la doble rendija. Si llamamos A y B a las dos rendijas, la solución de la ecuación de ondas de una partícula que viaja en este sistema puede designarse como ψ_A cuando solo está abierta la rendija A y como ψ_B cuando solo lo está B. ¿Qué ocurre cuando abrimos ambas rendijas? Los libros de texto suelen usar la solución $\psi_A + \psi_B$ para reflejar que



LOS PATRONES DE LA DOBLE Y LA TRIPLE RENDIJA

Si usamos tres rendijas en lugar de dos, el patrón de interferencia cambia. El estudio del nuevo patrón ha permitido matizar la manera tradicional de tratar el principio de superposición en ciertos casos. Esta versión del experimento también tiene implicaciones para la computación cuántica.

la partícula se encuentra en un estado de superposición en el que pasa por ambas rendijas. Esto es, sin duda, una aplicación del principio de superposición, aunque incompleta. La razón es sencilla: la situación en que ambas rendijas están abiertas no es una mera combinación de los casos en que tenemos cada rendija abierta por separado. Sabemos que cuando las dos están abiertas al mismo tiempo, la partícula de algún modo pasa por ambas e interacciona consigo misma, y no podemos representar esas interacciones simplemente sumando las dos soluciones.

Los científicos ya habían apuntado que podría ser necesario añadir una corrección para hacer nuestras ecuaciones más precisas, la cual puede cuantificarse mediante el llamado parámetro de Sorkin (predicho en 1994 por el físico Rafael Sorkin, por entonces en la Universidad de Siracusa). Pero la mayoría de los investigadores han supuesto que este término sería despreciable. Y de hecho sabemos que no puede ser demasiado grande: si no, se habría observado mucho antes. Pero nuestro experimento de la triple rendija ha demostrado que la corrección existe y no siempre es tan pequeña como para ignorarla. El uso de tres o más rendijas nos proporciona un buen banco de pruebas, ya que permite medir una cantidad (el parámetro de Sorkin) que solo es distinta de cero si la corrección existe. (En el caso de la doble rendija, el término de corrección se suma a una cantidad que ya es distinta de cero, por lo que su presencia no resulta evidente.)

Llevo más de una década trabajando en el experimento de la triple rendija. En 2010, mis colaboradores y yo publicamos nuestros primeros resultados en *Science*. En 2014 realizamos nuevas pruebas en el observatorio astronómico de Gauribidanur, en la India, usando microondas. Llevamos a cabo el proyecto en una carpa instalada en un descampado, junto a un sembrado de maíz. Aunque pueda parecer un entorno extraño para un experimento físico de precisión, el maíz absorbe las microondas y nos proporcionó protección contra señales indeseadas que podrían haber interferido con el experimento. El hecho de trabajar sin paredes ni muchos equipos que pudieran reflejar las ondas también ayudó. Además, nuestro emplazamiento aislado tenía poca cobertura móvil —otra ventaja de cara a evitar la contaminación— y nos permitió realizar el experimento a gran escala.

Empleamos dos antenas de bocina, una para emitir los fotones de microondas y otra para detectarlos. Entre ellas situamos

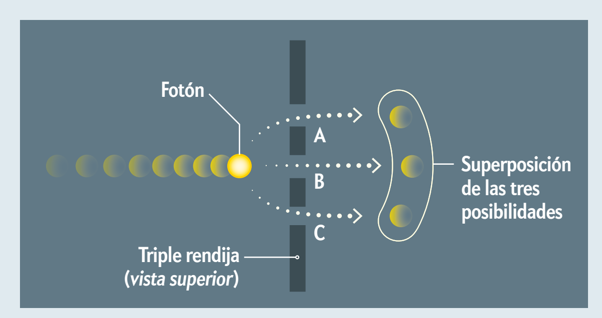
COMPUTACIÓN

Rendijas, qutrits y ordenadores cuánticos

Los ordenadores cuánticos prometen una mayor velocidad de cálculo que las máquinas clásicas. La mayoría de los bits cuánticos, o qubits, tienen dos posibles estados (estados base), igual que los bits tradicionales. Pero los bits cuánticos con tres o más estados base ofrecen ventajas.

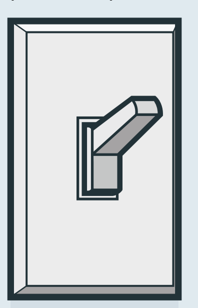
GENERAR UN QUTRIT CON UN SOLO FOTÓN

Un fotón (una partícula de luz) tiene la misma probabilidad de pasar a través de cualquiera de las rendijas. Una partícula clásica atravesaría solo una de ellas, pero una partícula cuántica puede viajar por las tres, adoptando una superposición de estados asociados a tres posiciones distintas. El fotón puede entonces usarse como un «qutrit» con tres estados base.



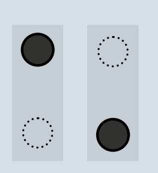
COMPUTACIÓN CUÁNTICA CON QUTRITS

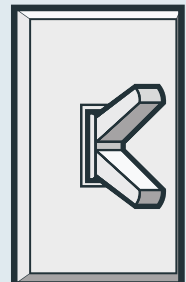
Para crear un ordenador cuántico con un cierto número de posibles estados, se necesitarían menos qutrits que qubits bidimensionales. Esto supone una ventaja, ya que cuantos más bits se emplean, más probable es que el ordenador pierda sus propiedades cuánticas.



BIT

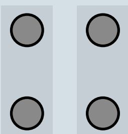
Un bit clásico tiene dos estados base (como un interruptor) y solo puede hallarse en uno o en el otro. Con dos bits tenemos cuatro posibles estados.

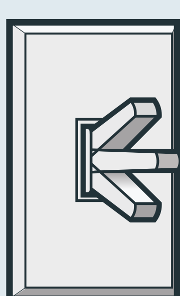




QUBIT

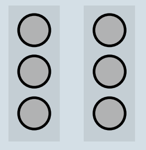
Un bit cuántico también tiene dos estados base, pero puede estar en ambos a la vez. El número total de estados es 2^n, donde n es el número de qubits. Dos qubits poseen $2^2 = 4$ estados.





QUTRIT

Un qutrit tiene tres estados base, por lo que un conjunto de n qutrits posee 3^n estados. Por ejemplo, con dos qutrits hay $3^2 = 9$ estados.



NICK BOCKELMAN

una placa con tres ranuras, cada una de 10 centímetros de ancho y separadas por 13 centímetros. Manteniéndonos fieles al estilo de los primeros experimentos con rendijas, instalamos el detector sobre un raíl, lo que nos permitió moverlo y medir diferentes patrones de interferencia en función de su posición. El patrón de interferencia que observamos no se ajustaba a la solución aproximada de la ecuación de ondas dada por $\psi_A + \psi_B$, pero sí a la que incluye un parámetro de Sorkin no nulo.

También usamos un material absorbente para bloquear el espacio entre las rendijas, evitando así que los fotones viajaran de una a otra e interaccionasen con las rendijas vecinas. Al hacer esto, observamos que el valor del parámetro de Sorkin cambiaba con el tamaño del obstáculo, lo que demuestra que esta cantidad mide la interacción entre las rendijas y varía en función de la intensidad de la interacción. Este hallazgo sirvió para verificar que el término de corrección que habíamos medido no se debía a algún error sistemático que hubiéramos pasado por alto, sino que era exactamente lo que estábamos buscando.

Nuestro experimento constituyó la primera validación concluyente del parámetro de Sorkin como corrección al principio de superposición en el dominio clásico de las microondas. Los resultados, publicados en 2018 en la revista *New Journal of Physics*, ya han provocado algunas modificaciones en los libros de texto y afectan a nuestra concepción básica de la física fundamental. También podrían tener implicaciones para el trabajo de los astrónomos y astrofísicos que estudian las señales del universo primitivo. Estas investigaciones a menudo emplean redes de radiotelescopios terrestres y, por lo general, combinan las señales recibidas por cada antena. Pero ahora que sabemos que la solución de la ecuación de ondas no es simplemente la suma de las soluciones individuales, tal vez sea necesario revisar algunos cálculos para incluir el correspondiente parámetro de Sorkin. En última instancia, nuestros hallazgos podrían ayudar a los científicos a modelizar mejor los errores que afectan a estas observaciones.

QUTRITS CUÁNTICOS

Nuestro experimento de la triple rendija no solo es interesante desde el punto de vista teórico, sino que también podría tener aplicaciones prácticas. En concreto, esperamos que ayude a diseñar nuevas herramientas para la computación cuántica.

Los ordenadores cuánticos aprovechan leyes cuánticas como el principio de superposición para realizar cálculos mucho más deprisa que las máquinas clásicas. Podemos pensar en un bit tradicional como si fuera un interruptor que puede estar «encendido» o «apagado» (lo que corresponde al valor 1 o 0 en código binario). Pero, en el mundo cuántico, un interruptor no tiene por qué estar o encendido o apagado: puede estar de ambas formas. En un qubit, podemos definir un estado tal que el sistema tenga simultáneamente una cierta probabilidad de encontrarse en el estado «encendido» y otra de estar en el estado «apagado». Esta combinación de estados con una cierta probabilidad de que ocurra cada uno de ellos es la esencia de la superposición.

Los dos estados que contribuyen a la superposición se llaman estados base. Un qubit estándar tiene dos estados base, y con n qubits tenemos 2^n posibles estados. Así que con dos qubits hay $2^2 = 4$ posibles estados. Pero mientras que un sistema de n bits clásicos solo puede adoptar uno de esos 2^n posibles estados, en el caso de n bits cuánticos pueden coexistir las 2^n posibilidades. La potencia de la computación cuántica emana de los ingeniosos algoritmos cuánticos que logran explotar el estado de superposición para realizar cierta clase de operaciones a velocidades mucho mayores que los ordenadores clásicos.

Pero para alcanzar este objetivo necesitamos un número relativamente grande de qubits (desde luego, más de dos). Muchos investigadores se han fijado como meta $n = 50$, un número que ofrece muchas posibilidades interesantes para los algoritmos cuánticos. Con 50 qubits disponemos de 2^{50} posibles estados para realizar operaciones cuánticas. Hace poco, Google afirmó haber logrado este hito al completar con éxito un cálculo de muestreo aleatorio en un procesador cuántico de 54 qubits.

Sin embargo, alcanzar un número elevado de qubits no es nada sencillo. Cuantos más qubits juntemos, más probable es que pierdan su capacidad cuántica de hallarse en una superposición y «colapsen» para convertirse en bits clásicos. Eso es lo que sucede cuando un qubit interacciona con el entorno y pierde su «coherencia» cuántica. A medida que intentamos poner más qubits en una superposición coherente, resulta cada vez más difícil mantener este estado durante mucho tiempo. Es parecido a juntar gente en una sala para una fiesta. Si tenemos 10 personas en una habitación de 10 metros cuadrados, los invitados pueden coexistir sin invadir el espacio de los demás. Pero si aumentamos el número de personas a 30, la habitación empieza a estar abarrotada y la coexistencia pacífica desaparece. Lo mismo ocurre con los qubits.

Una alternativa a la estrategia habitual de juntar muchos qubits en un mismo espacio es aumentar la dimensión de cada uno de ellos. Para entender por qué esto resulta de ayuda, consideremos un sencillo problema matemático:

¿Cuánto es 2^3? Por supuesto, la respuesta es 8 ($2 \times 2 \times 2 = 8$).

Y ¿cuánto es 3^2? En este caso la respuesta es 9 ($3 \times 3 = 9$).

Los dos resultados son del mismo orden de magnitud (muy parecidos). En consecuencia, si en lugar de tres qubits usáramos dos qutrits (bits cuánticos tridimensionales), tendríamos acceso a un número similar de posibles estados. Así que ¿por qué no intentamos aumentar la base en vez del exponente? Incrementando el número de estados base necesitaríamos menos bits para alcanzar el mismo objetivo. Esta es la idea que motiva la investigación en sistemas cuánticos con más dimensiones.

Nuestra estrategia tiene otra ventaja: ya no estamos limitados por el código binario. Consideremos el resultado de un partido de fútbol. Normalmente pensamos en dos posibles resultados, «victoria» o «derrota», que podemos especificar usando dos estados, así que tendríamos suficiente con un qubit. Sin embargo, si añadimos otras dos posibilidades, por ejemplo «aplazado» y «empate», ya no basta con un qubit, sino que hacen falta dos. Pero si tuviéramos sistemas con cuatro estados (que podríamos denominar «ququads»), con uno de ellos sería suficiente.

Así pues, los sistemas cuánticos de dimensión superior, o qudits, pueden almacenar más información en un número menor de sistemas. Se ha demostrado teóricamente que esto también supone una ventaja en otro de los objetivos de los ordenadores cuánticos: crear comunicaciones seguras mediante la distribución cuántica de claves [*véase* «La privacidad en la era cuántica», por Tim Folger; Investigación y Ciencia, julio de 2016]. En este método, dos personas crean una clave secreta compartida para decodificar mensajes que solo pueden usar ellos. Si pudiéramos aumentar el número de estados base (y por lo tanto la dimensión) de los bits cuánticos, obtendríamos claves mucho más resistentes a cierto tipo de ataques. Además, los qudits también podrían proporcionar mayor aleatoriedad en la generación de números aleatorios.

Junto a estos beneficios, los sistemas basados en qudits también presentan algunos inconvenientes. Uno es la dificultad de construir sistemas físicos estables donde todos los estados base sean igual de fáciles de alcanzar. Por ejemplo, en ocasiones un sistema puede presentar un sesgo hacia su estado de energía mínima, o estado fundamental, que puede afectar a los cálculos. Un segundo obstáculo es que existen menos algoritmos y herramientas para los qudits que para los qubits, al tratarse de una línea de investigación más reciente. Aunque queda mucho por hacer, el gran número de problemas abiertos garantiza el interés y el potencial de este nuevo enfoque.

HACIA UN ORDENADOR CUÁNTICO

Así que ¿cómo podemos producir un qutrit operativo a partir del sencillo experimento de la triple rendija? El primer paso es generar fotones individuales.

Empezamos haciendo incidir un haz láser muy intenso sobre un material cristalino especial. Bajo ciertas condiciones, uno de cada 10^8 o 10^{10} fotones se divide en dos fotones de menor energía, en un proceso denominado conversión paramétrica espontánea. Si registramos uno de los fotones resultantes con un detector de fotones individuales, eso delata la presencia del otro, dado que ambos se producen simultáneamente. A continuación, podemos usar este segundo fotón en nuestros experimentos.

En nuestro trabajo, hemos jugado con las propiedades del fotón «padre» para garantizar que los fotones «hijos» comparten sus características. Se envía el fotón padre hacia tres rendijas, con lo que su perfil espacial reproduce el de la triple rendija, y los hijos heredan este mismo perfil. El fotón adopta un estado de superposición, proporcionándonos un qutrit «espacial» cuyos tres estados base son las posiciones de las tres rendijas.

Aun así, el qutrit que hemos creado está muy lejos de ser lo que precisamos para construir un ordenador cuántico funcional. Lo que necesitaríamos es generar numerosos qutrits con nuestro sistema de rendijas e introducirlos en una arquitectura de puertas lógicas que permita usarlos para realizar cálculos. Mi equipo está centrado en este objetivo. Hemos de diseñar los elementos ópticos necesarios para llevar a cabo estas manipulaciones y a continuación miniaturizar todos los componentes para que puedan conformar un sistema computacional operativo.

La triple rendija representa el yin y el yang de la investigación en física, con una vertiente fundamental y otra funcional. Nuestro trabajo sobre el principio de superposición y sus correcciones, medidas por vez primera, explora los conceptos más básicos de la física. Entretanto, los qudits basados en el experimento de la triple rendija suponen un hito tecnológico en el progreso hacia la computación cuántica y las comunicaciones cuánticas de dimensión superior. El más famoso de los experimentos físicos sigue ofreciéndonos nuevas ideas y posibilidades.

PARA SABER MÁS

Ruling out multi-order interference in quantum mechanics. Urbasi Sinha et al. en *Science*, vol. 329, páginas 418-421, julio de 2010.

Measuring the deviation from the superposition principle in interference experiments. G. Rengaraj et al. en *New Journal of Physics*, vol. 20, art. 063049, junio de 2018.

EN NUESTRO ARCHIVO

La dualidad en la materia y en la luz. Berthold-Georg Englert, Marlan O. Scully y Herbert Walther en *IyC*, febrero de 1995.

La realidad de los cuantos. Anton Zeilinger en *IyC*, junio de 2009.

por Sergio A. Estay, Roberto Chávez y Álvaro Gutiérrez

Si eres investigador en el campo de las ciencias de la vida y la naturaleza, y tienes buenas fotografías que ilustren algún fenómeno de interés, te invitamos a participar en esta sección. Más información en **www.investigacionyciencia.es/decerca**

Larvas defoliadoras de los bosques australes

Las plagas de *Ormiscodes amphimone* son cada vez más frecuentes en el sur de Sudamérica, con miles de hectáreas afectadas

Adentrarse en un bosque de lengas (*Nothofagus pumilio*) que está siendo devorado por larvas de la polilla *Ormiscodes amphimone* resulta una experiencia escalofriante. Podemos observar miles y miles de ellas: unas trepan por los troncos, otras comen hojas y otras cuelgan o caen de las ramas.

O. amphimone es una polilla fitófaga nativa de Chile y Argentina. Las larvas pueden alimentarse de varias decenas de especies de plantas. Si bien muestran preferencia por los bosques de lengas, cuando se hallan en expansión atacan a casi cualquier especie presente en el lugar.

La mayoría de los brotes se han producido en la región chilena de Aysén, que tiene una superficie como la de Portugal. Los ataques de este insecto se conocen desde hace tiempo en la zona, según han relatado habitantes y guardaparques. Sin embargo, desde el 2000 se han intensificado y ya han afectado a más de 200.000 hectáreas, lo que convierte a esta plaga en la mayor perturbación biótica de los bosques australes. El aumento en la superficie y la frecuencia de los brotes parece estar asociado al importante ascenso de las temperaturas en la región durante este siglo.

Nuestro grupo ha estimado la superficie forestal dañada a partir de información satelital y algoritmos diseñados específicamente para estas investigaciones. Debe subrayarse que la cifra antes mencionada es una estimación conservadora, dado que solo se han incluido datos confirmados en el campo. No se han valorado muchas otras zonas gravemente alteradas ubicadas en partes donde la inspección sobre el terreno reviste una enorme dificultad.

Cuando las larvas comen las hojas, el árbol no muere de inmediato, pero hemos determinado que a la temporada siguiente crece menos y, bajo los sucesivos y frecuentes ataques, el árbol termina por morir. Tal respuesta representa una amenaza importante para una región donde un tercio de los bosques son de lengas.

—Sergio A. Estay
Universidad Austral de Chile
—Roberto Chávez
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
—Álvaro Gutiérrez
Universidad de Chile

TODAS LAS ILUSTRACIONES SON CORTESÍA DE RONALD ROCCO



LARVA DE *O. AMPHIMONE* sobre una rama. Las espinas que cubren todo su cuerpo son urticantes y se han convertido en un problema para las personas y los animales de la región.

▲ VISTA AÉREA DE UN BOSQUE DE LENGAS atacado por las larvas. Cuando el brote termina, a finales del verano austral, la apariencia del bosque es similar a la de invierno, cuando los árboles han perdido las hojas. El verde intenso corresponde a árboles que aún no han sido atacados. (Imagen obtenida con un dron.)

▼ UNA MULTITUD DE LARVAS devoran las hojas de una lenga, árbol caducifolio que puede superar los 150 años de edad (*izquierda*). Cuando finalizan se dirigen en procesión a otra lenga, por cuyo tronco ascienden (*derecha*). Los ataques se producen durante el verano austral (entre diciembre y marzo), cuando los árboles tienen las hojas.





por Philip Goff

Philip Goff es filósofo e investigador de la consciencia en la Universidad de Durham. Uno de sus propósitos es integrar la consciencia en nuestra cosmovisión científica.



El gran error de Galileo

Cómo el gran experimentador creó el problema de la consciencia

Si un árbol cae en un bosque y no hay nadie allí para verlo, ¿hace algún sonido? Uno podría pensar que es un antiguo enigma filosófico. De hecho, el padre de la ciencia moderna, Galileo Galilei, dio una respuesta definitiva a esta pregunta en el siglo XVII. Y la forma en que Galileo respondió esta cuestión conformó los fundamentos filosóficos de la cosmovisión científica que sigue vigente hoy. Además, hay un gran problema en el núcleo de esta cosmovisión científica: hace imposible una ciencia de la consciencia.

Un momento clave en la revolución científica fue la declaración de Galileo de que las matemáticas habían de ser el lenguaje de la nueva ciencia; la nueva ciencia había de tener un vocabulario puramente cuantitativo. Este es un momento muy comentado. Lo que se ha discutido menos es el trabajo filosófico que Galileo tuvo que llevar a cabo para llegar a este punto. Antes de Galileo, la gente pensaba que el mundo físico estaba lleno de cualidades: había colores en la superficie de los objetos, sabores en la comida y olores flotando en el aire. El problema es que estas clases de cualidades no pueden atraparse en el vocabulario puramente cuantitativo de las matemáticas. No puede plasmarse el sabor picante del pimentón, por ejemplo, en una ecuación. Esto suponía un desafío para la aspiración galileana de describir por completo el mundo físico en términos matemáticos.

La solución de Galileo fue proponer una teoría filosófica de la realidad radicalmente nueva. Según esta, las cualidades no están realmente en el mundo exterior; por el contrario, se hallan en la consciencia del observador. La rojez del tomate no está realmente en la superficie del tomate, sino más bien en la consciencia de la persona que la percibe; el sabor picante del pimentón no está realmente en el pimentón, sino en la consciencia de la persona que lo degusta. Volviendo al ejemplo con el que comenzábamos, cuando un árbol se

GALILEO le muestra al dux su telescopio, 1609.

WIKIMEDIA COMMONS/DOMINIO PÚBLICO

derrumba en un bosque, el ruido que hace al caer no está realmente en el bosque, sino en la consciencia de un espectador. Sin espectador, sin consciencia, no hay sonido.

Galileo, por así decirlo, despojó al mundo físico de sus cualidades. Y después de haber hecho eso, todo lo que quedaba eran las propiedades puramente cuantitativas de la materia (tamaño, forma, posición, movimiento), propiedades que pueden plasmarse en la geometría matemática. En la cosmovisión de Galileo hay, pues, una división radical entre dos mundos: por un lado, el mundo físico, con sus propiedades puramente cuantitativas, que es el dominio de la ciencia; por otro, el mundo de la consciencia, con sus cualidades, que está fuera del dominio de la ciencia.

Esta división fundamental fue la que posibilitó la física matemática: una vez eliminadas las cualidades, todo lo que quedaba del mundo físico podría ser plasmado en las matemáticas. Y, por tanto, Galileo nunca pretendió que la ciencia natural nos diese una descripción completa de la realidad. Todo su proyecto se basó en la premisa de poner la consciencia cualitativa fuera del dominio de la ciencia.

¿Qué tienen que ver estas discusiones del siglo XVII con la ciencia contemporánea de la consciencia? Actualmente hay un amplio acuerdo en que la consciencia plantea uno de los grandes retos de la ciencia contemporánea. Pero, a pesar del rápido progreso de nuestra comprensión del cerebro, todavía no tenemos una explicación de cómo la compleja señalización electroquímica puede dar lugar a un mundo interior subjetivo de colores, sonidos, olores y sabores.

Muchos asumen que la forma de afrontar este desafío tan fundamental consiste simplemente en continuar aplicando los métodos que suelen emplearse para investigar el cerebro. Se cree que el gran éxito que la ciencia física ha cosechado a la hora de explicar cada vez más profundamente nuestro universo debería hacernos confiar en que esta misma ciencia acabará por desentrañar el rompecabezas de la consciencia.

En mi opinión, este enfoque ordinario hunde sus raíces en un profundo malentendido de la historia de la ciencia. Celebramos con razón el triunfo de la ciencia física, pero esta ha tenido éxito precisamente porque fue diseñada, por Galileo, para excluir la consciencia. Si Galileo viajara en el tiempo hasta nuestros días y escuchase hablar sobre este problema de la explicación de la consciencia en términos de la ciencia física, diría: «¡Claro que no puedes hacer eso! Diseñé la ciencia física para tratar con cantidades, no con cualidades». Y el hecho de que la ciencia física haya demostrado una gran eficacia al excluir la consciencia no nos da motivos para pensar que va a funcionar igual de bien cuando lo que se proponga es explicar la consciencia misma.

Ello no quiere decir que la ciencia física no tenga papel alguno en la ciencia de la consciencia. Los neurocientíficos han hecho grandes progresos en el mapeo de las correlaciones existentes entre la actividad cerebral y la experiencia consciente. La teoría de la información integrada, de Giulio Tononi, por tomar un ejemplo destacado, propone que la consciencia se correlaciona con la máxima información integrada, una noción para la que la teoría da una precisa caracterización matemática. Pero las meras correlaciones no constituyen una teoría de la consciencia.

Todo su proyecto [de Galileo] se basó en la premisa de poner la consciencia cualitativa fuera del dominio de la ciencia

Lo que necesitamos es poder explicar esas correlaciones que descubren los neurocientíficos. ¿Por qué la máxima información integrada, una propiedad cuantitativa, siempre va de la mano de la consciencia, un fenómeno cualitativo? El problema es que nuestra adopción de la visión de Galileo del mundo físico nos impide responder a esta pregunta. La consciencia se define esencialmente por las cualidades (colores, sonidos, olores, sabores) que caracterizan cada segundo de la vida consciente.

Y esas cualidades, por definición, no pueden ser incorporadas a una imagen puramente cuantitativa del mundo físico. La comprensión galileana del mundo físico como puramente cuantitativo nos impide unir lo cualitativo y lo cuantitativo en una imagen única y unificada de la realidad. Lo más que podemos hacer es trazar mapas de las correlaciones.

Los pesimistas deducirán de estas consideraciones que nunca tendremos una ciencia de la consciencia, que la consciencia siempre será algo mágico y misterioso. Ese no es mi enfoque. Creo que podemos tener confianza en que algún día tendremos una ciencia de la consciencia, pero necesitamos repensar lo que es la ciencia. La ciencia de Galileo no fue diseñada para tratar con la consciencia. Si ahora queremos una ciencia de la consciencia, tenemos que pasar a una concepción «post-galileana» más amplia del método científico, una concepción que tome en serio tanto las propiedades cuantitativas de la materia que conocemos por medio de la observación y el experimento como la realidad cualitativa de la consciencia que cada uno de nosotros conocemos mediante la consciencia inmediata que tenemos de nuestros sentimientos y experiencias.

Se requiere nada menos que una revolución, y ya está en camino. Científicos y filósofos han empezado a unirse para sentar las bases de un nuevo enfoque de la consciencia. Y ello reviste una gran importancia. El cambio de cosmovisión que se requiere no puede menos que tener profundas implicaciones para la sociedad. La consciencia se halla en la raíz de la identidad humana; de hecho, se puede decir que es la base de todo lo valioso de la existencia humana. Esta nueva revolución científica transformará no solo nuestra comprensión del universo físico, sino también nuestra comprensión de lo que significa ser un ser humano. IyC

PARA SABER MÁS

La conciencia explicada: Una teoría interdisciplinar. Daniel Dennet. Paidós. 1995.
Aping mankind: Neuromania, darwinitis and the misrepresentation of humanity. Raymond Tallys. Acumen. 2011.
La mente y el cosmos: Por qué la concepción neo-darwinista materialista de la naturaleza es, casi con certeza, falsa. Thomas Nagel. Biblioteca Nueva. 2014.
La conciencia inexplicada: Ensayo sobre los límites de la comprensión naturalista de la mente. Juan Arana. Biblioteca Nueva. 2015.
Galileo's error: Foundations for a new science of consciousness. Philip Goff. Knopf Doubleday. 2019.

EN NUESTRO ARCHIVO

La teoría de la información integrada. Christof Koch en *MyC* n.º 73, 2015.
En busca de la consciencia: Claves sobre cómo el cerebro construye la mente. VV.AA. Colección *Cuadernos de MyC* n.º 13, 2016.
¿Qué es la consciencia? Christof Koch en *IyC*, agosto de 2018.

por Paul Smaldino



Paul Smaldino es profesor adjunto de ciencias cognitivas y de la información en la Universidad de California en Merced.

La ciencia necesita mejores teorías

Plantear las preguntas acertadas evitaría muchos problemas de reproducibilidad

Se ha vertido mucha tinta para describir formas de mejorar la reproducibilidad en la ciencia: prerregistro, datos abiertos, código abierto. Todas estas iniciativas son necesarias pero insuficientes. La cuestión estriba en que no solo queremos que la ciencia sea reproducible. Queremos que contribuya a darle sentido al mundo. Para ello, debemos crear mejores hipótesis; estas, a su vez, requieren mejores modelos y mediciones.

En 2016 publiqué un modelo teórico en *Royal Society Open Science* en el que demostraba que la mala ciencia (aquellas prácticas menos rigurosas que permiten producir más artículos en menos tiempo) podría superar los estudios más robustos. Sugería que, a la hora de minimizar la cantidad de falsos descubrimientos, la formulación de mejores hipótesis tiene al menos tanta importancia como la reducción de errores metodológicos.

¿A quién le importa que pueda reproducirse un experimento que determina que la gente encuentra más cálida una habitación tras leer una historia sobre personas decentes? ¿Nos ayudará eso a desarrollar mejores teorías?

Para generar una buena hipótesis, necesitamos una buena teoría. Y esta ha de cumplir al menos dos requisitos. Primero, que sirva para construir modelos matemáticos o informáticos que produzcan resultados claros y comprobables. Toda disciplina científica dispone de ellos: los físicos emplean modelos de fuerza y momento para predecir el movimiento de los cuerpos; los epidemiólogos, modelos de contagio para estudiar la propagación de enfermedades; los neurocientíficos, modelos de secuencias de potenciales de acción para comprender el flujo de información en el cerebro; los científicos sociales, modelos de juegos para entender las normas sociales.

En segundo lugar, una buena teoría debe tener sentido o, al menos, reconocer sus contradicciones. Considérese el ejemplo de los físicos cuando «descubrieron» neutrinos que viajaban más rápido que la luz, lo que violaba la teoría de la relatividad. Dado que necesitaban que esos resultados fueran coherentes con un amplio marco teórico, continuaron indagando hasta descubrir que su hallazgo provenía de un cable de fibra óptica suelto. No todas las afirmaciones sorprendentes son siempre erróneas, pero han de someterse a un minucioso escrutinio.

Si un modelo útil deriva en una mejor ciencia, entonces ¿cómo se perfeccionan los modelos? Con mejores mediciones. Fijémonos en el trabajo de Tycho Brahe, gran astrónomo del siglo XVI que, sin embargo, pensaba que el Sol orbitaba alrededor de la Tierra. Aun así, sus cuidadosas medidas de la posición de los planetas sirvieron para que Johannes Kepler determinara que sus órbitas eran elípticas. A partir de ahí, Isaac Newton pudo formalizar su teoría de la gravitación universal, lo cual permitió a los investigadores modernos plantear incontables preguntas sobre el movimiento planetario, la cosmología, la balística, la ingeniería, etcétera.



Si algo no puede medirse con fiabilidad, resulta complicado elaborar una teoría. Magnitudes como la posición, la masa y el tiempo son relativamente fáciles de medir, al menos en algunas escalas. Los científicos cognitivos miden sin problema la conductividad de la piel, los tiempos de reacción y el número de palabras; ello les permite observar regularidades y variaciones y, por tanto, construir modelos verificables. Otros campos, incluidos aquellos en los que trabajo, se topan con mayores dificultades. Los psicólogos intentan medir las emociones, las identidades y las creencias. Los científicos sociales tratan de medir la desigualdad, la polarización y la desinformación. Los científicos biomédicos intentan medir la eficacia de los tratamientos en poblaciones pequeñas y heterogéneas.

Creo que muchas ciencias que lidian con el problema de la reproducibilidad son las que se enfrentan a los retos más apremiantes en lo que se refiere a las mediciones. La clave no radica solo en encontrar una medición que pueda realizarse con precisión y describirse con transparencia. También deben identificarse propiedades que puedan medirse con fiabilidad, conformar la teoría y prestarse a la cuantificación en modelos formales.

En una situación ideal, las teorías, los modelos y las medidas interactuarán para formar un círculo virtuoso. Los modelos nos permiten estudiar las suposiciones sobre el mundo y descubrir sus consecuencias. Los resultados muestran qué mediciones se necesitan para corroborar las suposiciones, y las medidas proporcionan patrones empíricos que invitan a una explicación, que los modelos pueden aportar. Y así sucesivamente.

Para comprobar las hipótesis es absolutamente imperativo disponer de mejores métodos, los cuales ya se integran en la formación de los científicos y en la manera de hacer ciencia. De modo que ahora es el momento de centrarse en adoptar mejores prácticas para generar hipótesis. Unos métodos mejores nos ayudarán a obtener las respuestas correctas; los modelos y las mediciones asegurarán que planteemos las preguntas adecuadas.

Artículo original publicado en *Nature* vol. 575, pág. 9, 2019. Traducido con el permiso de Nature Research Group © 2019

Con la colaboración de nature

por Pere Castells y Claudi Mans

Claudi Mans es catedrático emérito de ingeniería química de la Universidad de Barcelona y divulgador científico.

Pere Castells, experto en ciencia y cocina, es presidente del congreso mundial Science&Cooking.



El pan

Mientras unos le rinden culto, otros lo evitan

Nuestra relación con el pan ha sufrido en los últimos cincuenta años algunos bandazos. Su presencia en las mesas era antes incuestionable. Diversos rituales cotidianos le daban un valor casi religioso: antes de cortar un pan se lo señalaba con un signo de la cruz, y cuando caía al suelo un trozo de pan se besaba. Pasó luego a ser denostado, para atribuirle —de forma injusta— una contribución a la obesidad.

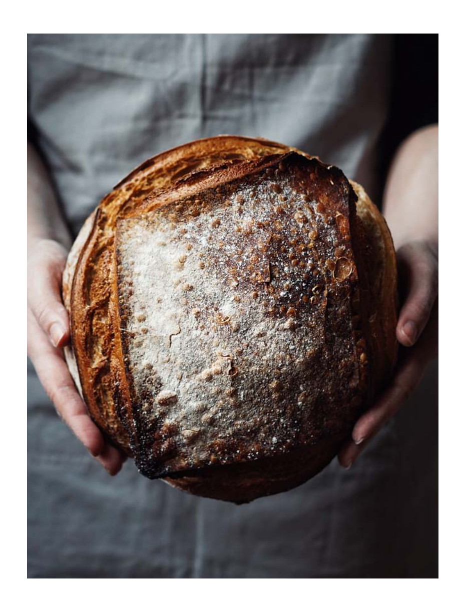
En los últimos años ha recuperado cierta fama. Han proliferado las panaderías y las variedades de pan, destacándose su valor gastronómico. Y el uso de trigos primitivos como el kamut o la espelta y otros cereales no habituales lo han convertido en emblema de producto genuino no ultraprocesado, y ligado a la alimentación «natural y saludable». Sin embargo, la demonización de las harinas refinadas y la intolerancia al gluten han generado rechazo entre determinados consumidores —aún los no intolerantes.

Se denomina *pan* a preparaciones muy variadas, que difieren no solo por la composición sino también por la forma y la textura. La distinción fundamental es entre panes simplemente cocidos y panes fermentados.

Los panes cocidos tienen como ingrediente básico un cereal (trigo, maíz, arroz) u otro producto que pueda molerse (trigo sarraceno), que se mezcla con agua y se cuece. El elemento calorífico puede ser simplemente una piedra calentada al fuego, un horno, o una sartén o cacerola. El resultado es una oblea que puede comerse sola, como envoltorio de otros alimentos (tacos mexicanos) o como acompañante de otros platos. Obleas de este tipo, denominadas galletas, eran muy apreciadas por su larga conservación y acarreadas en los buques pesqueros o de transporte desde tiempos remotos.

En los panes obtenidos por fermentación (que ya se elaboraban en Egipto hace unos 14.000 años), el factor determinante son las levaduras, que operan a modo de leudante: descomponen parte de los hidratos de carbono de la masa y generan dióxido de carbono, que, al ser retenido, aumenta el volumen de la misma. Básicamente, hay dos tipos de leudantes: los químicos y los biológicos.

Las «levaduras químicas» están constituidas por sales que al ser calentadas se descomponen, liberando dióxido de carbono y vapor de agua.



GETTY IMAGES/BOZDAMARE/ISTOCK

Las «levaduras biológicas», en cambio, suelen ser mezclas de organismos como *Saccharomyces*, que se alimentan de los azúcares desprendidos en las hidrólisis del almidón de las harinas; en su metabolismo desprenden dióxido de carbono y etanol. Durante la cocción se genera vapor de agua. La elasticidad de la masa de harina y agua permite que se retenga buena parte de los gases desprendidos, que incrementan el volumen de la masa durante la fermentación, y que aumenta aún más al ser cocida en el horno.

Muchas panaderías destacan el hecho de que usan como leudante masa madre. Se trata de una mezcla de harina, agua y levaduras procedentes de fermentaciones anteriores, una parte de la cual se reserva para horneados posteriores. (Los lectores que quieran prepararla en casa encontrarán información detallada del proceso en publicaciones como *Masa madre*, de Mariana Koppmann y Ramón Garriga.)

Durante la cocción del pan tienen lugar distintas reacciones. Al calentar la masa, se hidrolizan las harinas, se desnaturalizan las proteínas y se gelatiniza el almidón, con lo que aparecen azúcares libres. Si las hay, las levaduras químicas desprenden sus gases e hinchan la masa. Finalmente, las reacciones de Maillard (entre algunas de las proteínas de la masa y los azúcares libres) tienen lugar en la superficie de la masa de cocción, a partir de 150 ºC. Estas son las responsables del color, el aroma y el sabor de la corteza.

Podemos hacer pan también con pseudocereales (plantas no gramíneas y que dan harinas sin gluten). Las características del producto final dependerán precisamente de la cantidad de gluten. Las harinas con más gluten (harinas de fuerza) permiten obtener panes con mucha miga de grandes alveolos.

En la actualidad, las panaderías ofrecen una abundante variedad de productos basados en el pan, con todo tipo de ingredientes no presentes en las formulaciones ancestrales. Se añaden al pan una gran variedad de semillas o frutas, se mezclan harinas de varios cereales y se enriquecen las masas con azúcar, mantequilla u otras grasas, huevo y otros ingredientes que permiten obtener panes con texturas, sabores, formas y colores variados.

La importancia del pan en la sociedad actual se ha visto reflejada en *Modernist bread* (2017), de Francisco Migoya y Nathan Myhrvold, un estudio extenso de 5 volúmenes que muestra las grandes posibilidades de este producto para las generaciones venideras.



EVOLUCIÓN

PARASITISMO DE CRÍA EN LAS AVES: MÁS ALLÁ DE LA PUESTA

UN POLLO DE CUCO (*Cuculus canorus*) es alimentado por el carricero políglota (*Acrocephalus palustris*), una de sus especies hospedadoras en los bosques europeos. ¿Cómo consigue el cuco que el carricero se ocupe de él?

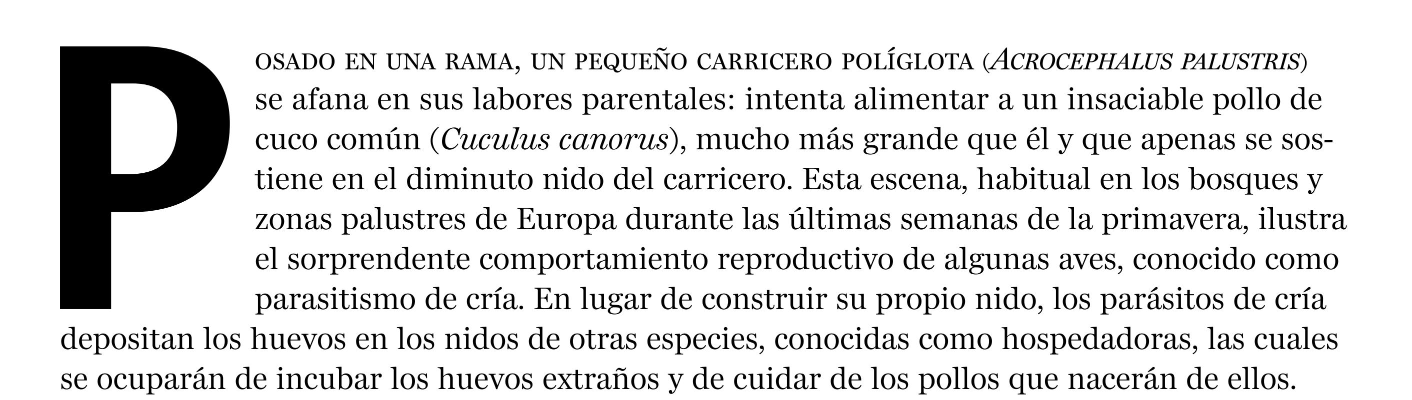


En los últimos años se ha demostrado que la «guerra» coevolutiva entre los parásitos de cría y sus hospedadores se extiende a todas las etapas del ciclo reproductivo. Esta interacción ha dado lugar a algunas de las adaptaciones biológicas más asombrosas

Francisco Ruiz-Raya y Manuel Soler

Francisco Ruiz Raya, doctor en biología, es investigador del Departamento de Zoología de la Universidad de Granada. Su campo de estudio es la ecología evolutiva, con especial énfasis en el parasitismo de cría en las aves.

Manuel Soler Cruz es catedrático del departamento arriba mencionado. Su labor se centra en la biología evolutiva, en particular, en la biología reproductiva de las aves y el parasitismo de cría. Es autor y editor de varios libros y más de doscientos artículos científicos en revistas internacionales especializadas.



Posado en una rama, un pequeño carricero políglota (*Acrocephalus palustris*) se afana en sus labores parentales: intenta alimentar a un insaciable pollo de cuco común (*Cuculus canorus*), mucho más grande que él y que apenas se sostiene en el diminuto nido del carricero. Esta escena, habitual en los bosques y zonas palustres de Europa durante las últimas semanas de la primavera, ilustra el sorprendente comportamiento reproductivo de algunas aves, conocido como parasitismo de cría. En lugar de construir su propio nido, los parásitos de cría depositan los huevos en los nidos de otras especies, conocidas como hospedadoras, las cuales se ocuparán de incubar los huevos extraños y de cuidar de los pollos que nacerán de ellos.

Pero ese comportamiento no se limita a la puesta en un nido ajeno. En sus primeros días de vida, el pollo de cuco escala las paredes del nido con el huevo del hospedador a sus espaldas. Su única intención es expulsarlo del nido, una acción que repetirá tantas veces como huevos haya en el nido. Eliminando la competencia, el pollo parásito se asegura de que los cuidados de sus padres adoptivos se concentren solo en él.

¿Qué ventajas le proporciona al cuco esta inusual conducta? La explicación evolutiva al parasitismo de cría la ofreció por primera vez Darwin en *El origen de las especies*. Según esta, los progenitores parásitos evitan invertir tiempo y energía en la construcción del nido y la cría de los polluelos, lo que les permite dedicarse a buscar alimentos y a producir más descendencia.

Desde el punto de vista de los padres adoptivos, que se esfuerzan por cuidar un pollo con el que no están emparentados, el parasitismo supone unos enormes costos. Como consecuencia, la selección natural ha favorecido en ellos la aparición de conductas de defensa para evitarlo, lo que a su vez ha provocado que los parásitos se armen con asombrosas y refinadas estrategias para contrarrestar dichas defensas. De forma similar a las potencias mundiales durante la Guerra Fría, ambas partes de esta interacción se hallan inmersas en una escalada armamentística en la que rivalizan por desarrollar las estrategias más poderosas y eficaces, lo que proporciona algunos de los mejores ejemplos de coevolución (evolución recíproca entre especies que interaccionan) que se han descrito.

El comportamiento reproductivo de los parásitos de cría ha fascinado a los naturalistas durante siglos. Después de Darwin, han sido numerosos los investigadores que han abordado el estudio de las presiones selectivas que dirigen la interacción entre los parásitos de cría y sus hospedadores. Hoy sabemos que el parasitismo de cría ha evolucionado en siete ocasiones de forma independiente en las aves: tres veces en los cucos (familia *Cuculidae*), y una vez en los tordos americanos (familia *Icteridae*), en los pinzones parásitos (familia *Viduidae*), en los indicadores (familia *Indicatoridae*), y en una especie de la familia *Anatidae*, el pato rinconero (*Heteronetta atricapilla*).

A pesar de sus aparentes beneficios, el parasitismo no es muy frecuente entre las aves. En total, se conocen poco más de un centenar de especies parásitas de cría, lo que supone tan solo un 1 por ciento de las especies de aves existentes. Esta baja cifra se debe a que ser un parásito de cría no resulta nada sencillo. Por un lado, el parásito tiene que superar importantes desafíos evolutivos, como conseguir que sus pollos aprendan a reconocer a los individuos de su propia especie a pesar de haber sido criados por otra. Por otro lado, deben hacer frente a las eficaces

EN SÍNTESIS

Algunas aves muestran una estrategia reproductiva peculiar denominada parasitismo de cría: ponen sus huevos en los nidos de otras aves, que se encargan de incubarlos y de criar a los polluelos que nacen.

La contienda que se establece entre el ave parásita y la hospedadora ha impulsado en ambas el desarrollo de una serie de adaptaciones y contradaptaciones, en una suerte de «guerra» coevolutiva.

En el pasado se pensaba que la coevolución entre parásito y hospedador se restringía a la etapa de huevo. En los últimos dos decenios se ha demostrado que, además de ser más compleja de lo que se suponía, tal interacción se extiende a todas las fases del ciclo reproductivo.

PÁGINAS ANTERIORES: OLDŘICH MIKULICA



HUEVOS POLIMORFOS: Las distintas aves hospedadoras de dos cucos africanos han reaccionado al parasitismo poniendo huevos con características distintivas. Ello dificulta que los parásitos pongan huevos que los imiten y ayuda al hospedador a identificar los huevos ajenos. La diversidad de colores y moteados se hace patente no solo entre diferentes especies hospedadoras (*columnas*), sino también entre distintas hembras de una misma especie (*elementos de la columna*).

ELEANOR CAVES Y CLAIRE SPOTTISWOODE

estrategias defensivas que han desarrollado los hospedadores para deshacerse de él.

Durante el siglo pasado, nuestra visión acerca de esta carrera de armamentos estaba basada en los descubrimientos llevados a cabo en el cuco común, a los que posteriormente se sumaron detallados estudios sobre el comportamiento parasitario del tordo de cabeza marrón (*Molothrus ater*). Aunque el cuco sigue siendo la especie más estudiada, las investigaciones realizadas durante los últimos veinte años, algunas lideradas por nuestro grupo, han demostrado que las relaciones coevolutivas entre los parásitos de cría y sus hospedadores son mucho más variadas y complejas de lo que se pensaba. También han revelado que la carrera de armamentos no está restringida a la etapa de huevo, sino que actúa en todas las fases del ciclo reproductivo. Los recientes y numerosos avances en el conocimiento sobre el parasitismo de cría en las aves están suponiendo un enorme impacto en nuestra comprensión general de la coevolución entre parásitos y hospedadores.

PRIMERA LÍNEA DE DEFENSA

Gran parte del éxito reproductor de los parásitos de cría depende de su eficacia a la hora de depositar los huevos en un nido ajeno, por lo que una primera línea de defensa del hospedador consistirá en evitar tal acción. La probabilidad de conseguirlo aumentará con un nido poco conspicuo y de difícil acceso para los parásitos, lejos de sus posaderos habituales. Como respuesta, algunos parásitos de cría del género *Molothrus* han desarrollado un mayor tamaño de las áreas del cerebro encargadas de procesar la información espacial, lo que mejora la localización de los nidos de sus hospedadores. Estas adaptaciones son especialmente patentes en las hembras parásitas, tal y como demostraron Mélanie Guigueno, de la Universidad McGill, y sus colaboradores en sus estudios con el tordo de cabeza marrón en Norteamérica.

En otros casos, los hospedadores modifican la fenología reproductiva para evitar que se solape con la del parásito. En Australia, ciertas hembras de acantiza coligualda (*Acanthiza chrysorrhoa*), principal hospedador del cuclillo broncíneo (*Chrysococcyx lucidus*), adelantan el inicio de la puesta, cuando los cucos todavía no han comenzado la suya. Como respuesta, algunos parásitos han desarrollado una estrategia conocida como *farming*: cuando un nido se halla en un estado de incubación demasiado avanzado para parasitarlo, lo que hacen es depredarlo. Ello obliga al hospedador a hacer una puesta de reposición, lo que ofrece al parásito la oportunidad de depositar su huevo en el nido.

La estrategia más extendida a la hora de prevenir el parasitismo, y puede que la más efectiva, es la defensa activa del nido. Algunas especies reaccionan de forma agresiva cuando descubren un parásito de cría cerca de su nido. Lo acosan e intentan atacarlo para expulsarlo de la zona. Con frecuencia, las parejas vecinas se unen y colaboran en esos ataques, e incluso emplean información social para modular su respuesta. En un estudio publicado en *Science*, Nicholas Davies y Justin Welbergen, de la Universidad de Cambridge, mostraron que los carriceros comunes (*Acrocephalus scirpaceus*) son más agresivos frente al cuco común tras observar que otros carriceros cerca de ellos despliegan estrategias de defensa contra el intruso. Como respuesta, los parásitos intentan evitar ser descubiertos. Adoptan comportamientos sigilosos en las inmediaciones del nido que pretenden parasitar o permanecen apostados en posaderos a la espera de una oportunidad favorable. Cuando esta se produce,



EN UN NIDO PARASITADO por un cuco común, la secuencia de hechos es la siguiente: primero aparece el huevo semejante a los huevos del hospedador, aunque algo más grande (*1*). Poco después de eclosionar (*2*), el pollo de cuco trepa por las paredes del nido para deshacerse, uno a uno, de los huevos del hospedador (*3*). Una vez solo en el nido, los padres adoptivos cuidarán exclusivamente de él (*4*).

emplean tan solo unos segundos en depositar el huevo en el nido del hospedador.

En algunas ocasiones, el parásito hace uso de sorprendentes adaptaciones morfológicas para burlar las defensas del hospedador. El cuco común muestra un característico plumaje barrado en la zona ventral muy similar al exhibido por el gavilán común (*Accipiter nisus*), uno de los depredadores de las especies hospedadoras del cuco. ¿Qué consigue con ello? Para responder a esa pregunta, Welbergen y Davies realizaron un nuevo estudio experimental utilizando varios modelos de cuco disecados a los que modificaron la coloración del plumaje ventral. Después los colocaron en las inmediaciones del nido de carriceros comunes y observaron su reacción. Comprobaron que los carriceros reducían el número de las agresiones contra los modelos de cuco que presentaban un barrado similar al del gavilán. Demostraron así que el plumaje críptico del cuco actúa como un «disfraz» de depredador.

En otros sistemas, el éxito del parasitismo se basa en la cooperación entre sexos, como se ha observado en el críalo europeo (*Clamator glandarius*), que, junto al cuco, son las dos especies parásitas de Europa. Según describieron Fernando Álvarez, de la Estación Biológica de Doñana, y Luis Arias de la Reina, de la Universidad de Córdoba, el macho y la hembra de críalo colaboran para parasitar los nidos de su principal especie hospedadora, la urraca común (*Pica pica*). En una elaborada maniobra de distracción, el macho se aproxima al nido de la urraca e intenta llamar su atención para que lo ataque y así abandone el nido por unos momentos. Cuando esto sucede, la hembra de críalo, que previamente se ha posicionado cerca del nido, aprovecha el momento para poner el huevo en el nido de la urraca en tan solo dos o tres segundos. Pero ¿qué ocurre si la urraca decide quedarse en el nido a pesar de todo? El críalo puede recurrir entonces a estrategias menos sutiles. En un estudio realizado por nuestro grupo, comprobamos que más de la mitad de los eventos de parasitismo se producían cuando la hembra de urraca se hallaba en el nido. Mediante filmaciones demostramos que la hembra de críalo lograba depositar su huevo en el nido mientras era agredida por la urraca. Ese comportamiento se ha documentado también en el tordo renegrido (*Molothrus bonariensis*), cuyas hembras consiguen parasitar los nidos del sisonte calandria (*Mimus saturninus*) a pesar de la respuesta agresiva de este. Aunque con su reacción el sisonte no logra evitar el parasitismo, reduce el número de los huevos destruidos por el tordo, que suele aprovechar la ocasión para romperlos con el pico.

ETAPA DE HUEVO: MIMETISMO Y POLIMORFISMO

Durante las últimas décadas del siglo pasado, se suponía que la relación coevolutiva entre los parásitos de cría y sus hospedadores tenía lugar, principalmente, a través de distintas estrategias de mimetismo en la etapa del huevo.

El llamativo parecido entre los huevos del cuco común y los de sus principales hospedadores europeos ha sido objeto de innumerables estudios. En respuesta al reconocimiento y expulsión del huevo parásito, el cuco ha ido perfeccionando el

GETTY IMAGES/VASSILIY VISHNEVSKIY/ISTOCK (1, 2 y 4); OLDŘICH MIKULICA (3)

mimetismo de sus huevos hasta hacerlos casi idénticos a los de sus hospedadores, tanto por lo que respecta al color como al moteado. En Europa, el cuco común parasita de forma habitual a más de 15 especies de aves. Ello ha dado lugar a la aparición de diferentes estirpes, o razas, de cuco cuyos huevos se mimetizan con los de su especie hospedadora hasta alcanzar niveles asombrosos. ¿Qué pueden hacer entonces los hospedadores para reconocer al intruso?

El estudio de varios ejemplos de parasitismo en África y Asia ha aportado información muy relevante sobre esa cuestión. Los hospedadores de algunos parásitos africanos muestran complejos patrones de moteado y variados tonos de coloración en sus huevos que actúan a modo de «firmas personalizadas». Estas características varían entre las hembras de una misma especie hospedadora y dan lugar a un extraordinario polimorfismo en la apariencia de sus huevos.

Sorprendentemente, esta estrategia también ha sido contrarrestada por algunos parásitos, como se ha comprobado en el sur del Sáhara entre el tejedor parásito (*Anomalospiza imberbis*) y su hospedador más común, la prinia modesta (*Prinia subflava*). Claire Spottiswoode y Martin Stevens, de la Universidad de Cambridge, utilizaron modelos de percepción visual para analizar cambios en la apariencia de los huevos de estas dos aves a lo largo de 40 años. Sus resultados revelaron que los patrones individuales de moteado y la coloración de los huevos de ambas especies se han diversificado rápidamente en tan solo unas décadas, lo que indica que parásito y hospedador siguen de cerca la trayectoria evolutiva del otro. De igual modo, ciertas especies hospedadoras del cuclillo didric (*Chrysococcyx caprius*), en Zambia, presentan huevos con patrones visuales impredecibles que dificultan un mimetismo exitoso por parte del parásito.

La evolución de polimorfismo parece ser un fenómeno más extendido de lo que se pensaba. Canchao Yang, de la Universidad de Hainan, y sus colaboradores, han estudiado este fenómeno en profundidad en los sistemas asiáticos, como el formado por el cuco común y su principal hospedador en China, el picoloro gorjigris (*Paradoxornis alphonsianus*). A diferencia de lo que ocurre con sus hospedadores europeos, el cuco común y el picoloro han desarrollado polimorfismo en el color de los huevos (que no son moteados): en ambas especies pueden ser blancos, azules o, con menor frecuencia, celestes.

Con unas características que los hacen únicos, los sistemas asiáticos son objeto de investigaciones especialmente prometedoras. Solo en China, se han documentado seis géneros y 17 especies de cucos, lo cual resulta extraordinario. La presencia de múltiples especies parásitas en una misma zona supone una oportunidad excepcional para estudiar las interacciones coevolutivas. Estas pueden llegar a ser muy complejas debido a la competencia entre parásitos por el uso de especies hospedadoras comunes, o la evolución, por parte de los hospedadores, de defensas específicas frente a diferentes especies de cuco.

DEFENSAS FLEXIBLES

Hasta hace apenas una década, se pensaba que la respuesta instintiva del hospedador ante la presencia de un huevo extraño en el nido consistía en expulsarlo de él. Pero, durante los últimos años, se han ido acumulando pruebas de que el reconocimiento del huevo no siempre conduce a su eliminación. Nuestro grupo ha comprobado que la respuesta del hospedador puede variar en función de la intensidad del parasitismo que sufre su población. En un estudio que llevamos a cabo en el sur de España, medimos el porcentaje de los nidos de alzacola rojizo (*Cercotrichas galactotes*) en los que esta ave expulsaba un huevo parásito de cuco introducido experimentalmente por nosotros. Verificamos que, en apenas diez años, la expulsión pasó del 65 por ciento a anularse por completo, lo cual atribuimos a la desaparición del cuco común en la zona. Las grabaciones que realizamos de los alzacolas en el nido revelaron que muchos individuos reconocían el huevo experimental intruso pero decidían no expulsarlo.

Aunque parezca sorprendente, la decisión de aceptar el huevo parásito puede no ser una mala estrategia en determinadas circunstancias, puesto que su expulsión no está exenta de costos: el hospedador podría eliminar alguno de sus huevos por error, o



JUSTIN SCHUETZ

EL POLLO PARÁSITO DEL GÉNERO *VIDUA* (*izquierda*) no solo imita las vocalizaciones de petición de alimento del pollo del hospedador, la estrilda común (*Estrilda astrild*, *derecha*); también muestra un impresionante mimetismo en las manchas y patrones de coloración del interior de la boca, lo que contribuye a que sean alimentados por los padres adoptivos.

bien dañar por accidente una parte de su puesta. Para evitar esos percances, han aparecido respuestas flexibles en el hospedador, que ajusta la conducta defensiva al riesgo real de parasitismo. En otras palabras, reacciona solo si existen evidencias claras de que puede haber un huevo intruso en el nido, como la presencia de parásitos adultos en las inmediaciones.

Hoy sabemos que el rechazo de los huevos extraños es un proceso muy complejo. Nuestras investigaciones en el mirlo común (*Turdus merula*) han revelado que algunas características de los huevos que parasitan su nido pueden ser clave en el resultado de la toma de decisiones. A pesar de reconocerlos como extraños, las hembras de mirlo aceptan con mayor frecuencia los huevos experimentales ligeramente más pesados o más grandes, probablemente porque el costo de expulsarlos es demasiado elevado. Las últimas investigaciones apuntan a que las respuestas antiparasitarias de las hembras podrían estar mediadas por la acción de hormonas implicadas en los cuidados parentales, como la prolactina, y en el propio metabolismo, como la corticosterona (asociada al estrés). Nuestros datos demuestran que la presencia de un huevo extraño altera los niveles de ambas hormonas en las hembras de mirlo, lo que parece determinar su respuesta frente al huevo. Sin duda, el futuro estudio de los mecanismos fisiológicos que intervienen en la conducta defensiva de los hospedadores será crucial para entender las variaciones de esta conducta, tanto entre individuos como entre especies.

Pero el hospedador no solo reacciona ante el huevo extraño. Su respuesta puede verse afectada también por el comportamiento de los parásitos adultos. En 1979, el biólogo israelí Amotz Zahavi propuso la sugerente hipótesis de que estos podrían recurrir a comportamientos mafiosos tomando represalias contra aquellos hospedadores que rechazaran sus huevos. Aunque sugerente, esa idea fue muy criticada y no había sido verificada de manera experimental. A finales del siglo pasado, nuestro grupo se propuso comprobarla en el críalo europeo, que parasita los nidos de urraca. Nuestras investigaciones demostraron que los críalos destruían todos los huevos de los nidos donde las urracas habían expulsado el huevo parásito. Como consecuencia, el éxito reproductivo de la urraca disminuía drásticamente, por lo que le resultaba más rentable aceptar el huevo parásito que deshacerse de él, según observamos; era la única posibilidad que tenía de sacar adelante alguno de sus propios polluelos. Después de ese trabajo, los comportamientos mafiosos se han descrito también en otras especies, como el tordo de cabeza marrón.

PARÁSITO DISFRAZADO DE HOSPEDADOR

En 2003, Naomi Langmore, de la Universidad Nacional Australiana, y sus colaboradores describieron en *Nature* una conducta fascinante. El maluro soberbio (*Malurus cyaneus*), un paseriforme australiano, era capaz de identificar el pollo parásito del cuco *Chrysococcyx*, al que abandonaba y dejaba morir de hambre en el nido. Este descubrimiento contradecía la idea ampliamente aceptada de que esa conducta no podía evolucionar porque conllevaba un costo muy elevado y escasos beneficios. En otras palabras, mientras que la expulsión del huevo extraño permite salvar a la propia descendencia, la expulsión del pollo parásito no, porque este ya se ha deshecho antes de todos los huevos del hospedador. Sin embargo, estudios posteriores fueron demostrando que algunas especies hospedadoras del género *Gerygone*, también paseriformes, iban un paso más allá y lograban expulsar el pollo parásito agarrándolo con su propio pico.

A raíz de esos hallazgos, surgieron nuevas pruebas sobre la discriminación de los hospedadores hacia los pollos parásitos, que dejaban de ser alimentados. Al mismo tiempo, se describieron numerosos casos de mimetismo visual y vocal (gritos de petición de alimento) en los pollos parásitos, como una estrategia para confundirse con los pollos del hospedador. Se trata de otro ejemplo de coevolución: el mimetismo es la manera que tienen los pollos parásitos de contrarrestar la capacidad de reconocimiento desarrollada por los hospedadores. En conjunto, esos hallazgos suponían una confirmación sólida de que la identificación de los pollos ajenos es mucho más generalizada de lo que se sospechaba hace apenas 15 años. Hoy se acepta

	HOSPEDADOR	PARÁSITO
ANTES DE LA PUESTA	Construye nidos ocultos	Desarrolla memoria espacial para localizar nidos
	Defiende el nido con agresividad	Imita el plumaje de un depredador (gavilán) para evitar la agresión
		Coopera con el otro sexo para distraer al hospedador
	La hembra no abandona el nido	Hace una puesta en segundos
		Parasita el nido con la hembra hospedadora en el nido
ETAPA DE HUEVO	Expulsa el huevo parásito	Destruye la puesta del hospedador (conducta mafiosa)
		Imita los huevos del hospedador
	Pone huevos de distinto aspecto (polimorfismo)	Imita el polimorfismo de los huevos del hospedador
ETAPA DE POLLO	La hembra reconoce al parásito y lo abandona, no lo alimenta o lo expulsa del nido	El pollo parásito expulsa del nido los huevos del hospedador para evitar la competencia
		El pollo parásito imita a los pollos del hospedador (mimetismo visual y auditivo)
ETAPA DE VOLANTÓN	La hembra reconoce al volantón parásito y no lo alimenta	El volantón parásito imita a los volantones del hospedador (mimetismo visual y auditivo)
		El volantón cambia de padres adoptivos

CARRERA DE ARMAMENTOS: El parasitismo de cría ha dado lugar a la aparición de una serie de adaptaciones y contradaptaciones tanto en la especie parásita como en la hospedadora en todas las etapas del ciclo biológico. Numerosos ejemplos de las conductas que se describen en la tabla se han descubierto en las últimas dos décadas.



UN VOLANTÓN DE CRÍALO EUROPEO (*Clamator glandarius*; *izquierda*) es alimentado por su principal especie hospedadora, la urraca común (*Pica pica*; *derecha*). Los pollos parásitos son alimentados por los hospedadores incluso después de abandonar el nido, aunque parásito y hospedador no guarden ningún parecido.

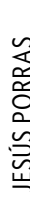
que la carrera de armamentos entre parásito y hospedador no se limita a la fase de huevo, sino que se extiende a la fase de pollos mientras permanecen en el nido.

Pero no solo eso. Se han hallado indicios de que la rivalidad se prolonga hasta el período de pollos volantones (cuando ya han abandonado el nido), un hecho que resultaba impensable a principios de este siglo. Aunque todavía están poco estudiadas, las adaptaciones y contradaptaciones en esta fase han sido demostradas en dos casos. Las pruebas más sólidas las han aportado María Cecilia de Marsico, de la Universidad de Buenos Aires, y sus colaboradores, en sus trabajos con el tordo músico (*Agelaioides badius*), un ave hospedadora de dos especies del género *Molothrus*: el tordo chillón (*M. rufoaxillaris*), su parásito especialista (solo lo parasita a él); y el tordo renegrido (*M. bonariensis*), un parásito generalista (parasita también a otras aves). El grupo de De Marsico descubrió que el tordo músico alimentaba a los volantones del parásito especialista, que imitaban tanto la apariencia como los gritos de petición de alimento de sus propios volantones; en cambio, rehusaba nutrir a los del parásito generalista, que no presentaban mimetismo alguno con los pollos hospedadores. Es decir, los volantones del tordo chillón han ido un paso más allá en el mimetismo que los del tordo renegrido.

El segundo ejemplo de adaptación en la fase de pollo volantón lo ofrece el sistema formado por el críalo (parásito) y la urraca (hospedador), en el que nuestro grupo ha hecho dos importantes descubrimientos. En primer lugar, comprobamos que, cuando el pollo de críalo no comparte el nido con los pollos de urraca (lo que representa la situación más habitual, porque los pollos hospedadores suelen morir de hambre en el nido como consecuencia de la competencia con el pollo parásito, mucho más eficaz pidiendo y consiguiendo alimento), las urracas cuidan y alimentan al volantón parásito incluso después de que este haya abandonado el nido. Sin embargo, cuando el pollo de críalo ha sido criado junto con pollos de urraca, los padres adoptivos reconocen al pollo parásito una vez abandona el nido y dejan de alimentarlo paulatinamente. El segundo descubrimiento fue que el críalo volantón que era abandonado no moría (como ocurría con el pollo de tordo renegrido cuando dejaba de ser alimentado por el tordo músico), sino que se dedicaba a buscar otras urracas y conseguía ser adoptado por aquellas que habían criado solo a críalos en sus nidos. Este es el único caso conocido en el que los pollos parásitos, tanto fuera como dentro del nido, desarrollan una adaptación distinta del mimetismo que les permite evitar ser reconocidos por los hospedadores.

Si bien las relaciones coevolutivas entre parásitos de cría y sus hospedadores están presentes en todas las etapas del ciclo reproductivo, la presencia de estrategias defensivas en una determinada etapa podría facilitar o bloquear la evolución de defensas en etapas posteriores. De esta manera, en especies en las que se ha desarrollado un reconocimiento de huevos efectivo, no sería esperable la evolución de la capacidad para reconocer pollos o volantones. En cambio, si el hospedador no ha desarrollado una defensa totalmente eficaz en ninguna de las fases, podría favorecerse en él la evolución de defensas en cualquiera de las etapas del ciclo reproductivo.

Con certeza, las investigaciones futuras aportarán nuevas pistas acerca del potencial desenlace de la relación coevolutiva que se establece entre los parásitos de cría y sus hospedadores. Algunos de los principales retos a los que se enfrentan los investigadores consisten en profundizar en el estudio de esta carrera de armamentos más allá de la etapa de incubación, así como desentrañar el papel de la fisiología en la regulación de las estrategias parasitarias y las defensas del hospedador. Las trayectorias coevolutivas entre parásitos de cría y hospedadores guardan un asombroso paralelismo, no solo entre aves filogenéticamente muy distanciadas (como *Clamator* y *Molothrus*), sino también entre grupos taxonómicos tan alejados como aves, peces e insectos, por lo que gran parte de las conclusiones alcanzadas en la investigación con aves serán extensibles a otros sistemas. IyC



PARA SABER MÁS

Cuckoos, cowbirds and other cheats. N. B. Davies. T & AD Poyser, 2000.
Cuckoos versus hosts in insects and birds: adaptations, counter adaptations and outcomes. Rebecca M. Kilner y Naomi E. Langmore en *Biological Reviews*, vol. 86, n.º 4, noviembre de 2011.
The frontline of avian brood parasite–host coevolution. William E. Feeney, Justin A. Welbergen y Naomi E. Langmore en *Animal Behaviour*, vol. 84, n.º 1, págs. 3-12, julio de 2012.
Longterm coevolution between avian brood parasites and their hosts. Manuel Soler en *Biological Reviews*, vol. 89, n.º 3, págs. 688-704, 14 de diciembre de 2013.
Avian Brood Parasitism. Behaviour, ecology, evolution and coevolution. Manuel Soler, ed. Springer, 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

Coevolución del cuco y sus patrones. N. B. Davies y M. Brooke en *IyC*, marzo de 1991.
Simpatría y coevolución entre el críalo y sus hospedadores. Manuel Soler en *IyC*, julio de 1992.

FARMACOLOGÍA

El poder terapéutico de las esferas de ADN

Las moléculas de ácidos nucleicos dispuestos en forma de esferas consiguen actuar sobre los tumores cerebrales, así como sobre otras enfermedades que no responden a los fármacos tradicionales

Chad A. Mirkin, Christine Laramy y Kacper Skakuj

El cáncer cerebral es terrible porque afecta a lo que consideramos el centro de la personalidad, de la mente y de la naturaleza humana. Es muy difícil de tratar porque crece dentro del cerebro, un órgano que ha evolucionado hacia la autoprotección. Sus numerosas defensas impiden la entrada de sustancias foráneas, entre las que figuran la mayoría de los fármacos contra el cáncer. De igual modo, la cirugía o la radioterapia acarrean un tremendo riesgo. Por todo ello, la tasa de supervivencia relativa a los cinco años para las personas de 55 a 64 años con un glioblastoma, el tipo más frecuente de tumor cerebral primario, es tan solo del 5 por ciento.

Hoy contamos con un tipo de fármacos nanométricos que viajan por el cuerpo y llegan al cerebro, donde consiguen acabar con las células cancerosas. Sobre el núcleo central de estas partículas farmacológicas se yerguen oligonucleótidos (hebras de ADN o ARN, las moléculas que indican a cada célula lo que tiene que hacer) igual que las púas del erizo de mar. Dichas partículas redondeadas y espinosas se denominan ácidos nucleicos esféricos (ANE). En un primer ensayo con ocho pacientes, llegaron hasta las células del glioblastoma, donde se unieron a otras moléculas que resultan clave para el crecimiento constante del cáncer.

Los fármacos esféricos parecen funcionar contra muchas enfermedades, como la atrofia muscular espinal (AME). Se trata de una dolencia terrible de los lactantes que les arrebata el control muscular, y les dificulta la deglución y la respiración hasta hacerlas imposibles. La mayoría de los niños con este trastorno fallecen antes de entrar en la guardería y hasta hace poco los médicos no podían hacer nada por ellos. En 2016, la Agencia Federal de Fármacos y Alimentos de EE.UU. (FDA) autorizó un remedio: un medicamento denominado Spinraza que se inyecta directamente en la médula espinal varias veces al año y que es uno de los más caros del mundo (125.000 dólares por inyección). Hace poco, utilizamos roedores para comparar ese medicamento con nuestras esferas de ácidos nucleicos. Estas entran en las células e interfieren con las moléculas mensajeras que provocan los síntomas de la AME. Las esferas multiplicaban por cuatro la supervivencia (115 días frente a 28 días) y provocaban muchos menos efectos secundarios.

Los ANE permiten esquivar los problemas que han plagado las investigaciones de la industria farmacéutica a la hora de desarrollar nuevos fármacos. Los medicamentos tradicionales

ENAN LIANG



Chad A. Mirkin es director del Instituto Internacional para Nanotecnología y catedrático de química, ingeniería química y biológica, ingeniería biomédica, ciencia de los materiales y medicina en la Universidad Noroccidental en Evanston, Illinois. Es fundador de Exicure, una empresa que desarrolla ácidos nucleicos esféricos con el fin de usarlos como fármaco.

Christine Laramy se doctoró en ingeniería química y biológica en la Universidad Noroccidental. En la actualidad es analista en el bufete de abogados Latham and Watkins.

Kacper Skakuj es estudiante de grado en el Departamento de Química de la Universidad Noroccidental.

son inespecíficos: afectan a muchas células y órganos, no solo los alterados, y de ahí sus numerosos efectos secundarios. Sin embargo, los ácidos nucleicos pueden diseñarse para que interfieran solo con los genes causantes de la enfermedad o con las moléculas que transmiten las instrucciones que controlan el comportamiento de una célula. En el pasado, los biólogos han intentado utilizar moléculas lineales de ácidos nucleicos, pero la capacidad de estas para alcanzar su destino específico es escasa. Dado que nuestro cuerpo dispone de defensas robustas (el sistema inmunitario) contra el material genético foráneo, lo habitual es que dichas defensas dañen inmediatamente los fármacos o se deshagan de ellos enviándolos a órganos como el hígado o los riñones.

Como tan solo miden una mil millonésima parte de metro, los ANE viajan a cualquier parte del organismo y se introducen en las células antes de que el sistema inmunitario consiga interceptarlos. La forma esférica permite el empaquetamiento de una gran densidad de «púas» de ácido nucleico en poco espacio, con lo que su interacción con los receptores celulares que dejarán entrar a las partículas es muy elevada. Una vez ahí, la secuencia de los componentes (los mismos nucleótidos, abreviados A, T, C y G, que constituyen el código de ADN) garantiza que actúen únicamente sobre una secuencia complementaria de ADN o de ARN (en esta última aparece U, uracilo, en vez de T). Las cadenas se diseñan para que solo se emparejen con secuencias intracelulares que desempeñan un papel crucial en la enfermedad. Los ANE no son balas mágicas y tendrán que pasar muchas más pruebas antes de extender su uso a los pacientes. Pero el potencial está ahí: puesto que los componentes nucleicos pueden reordenarse para que interfieran dentro de la célula con distintas moléculas causantes de enfermedades, las esferas tienen la posibilidad de abordar algunas de las enfermedades más debilitantes del mundo.

FÁRMACOS PROGRAMABLES

La forma tradicional de hallar tratamientos contra las enfermedades ha consistido en examinar cientos de miles de moléculas pequeñas, naturales o sintéticas, mediante un largo proceso de ensayo y error para ver si alguna de ellas ofrecía beneficios terapéuticos. Aunque esta estrategia nos haya permitido descubrir numerosos medicamentos sorprendentes, como los antibióticos, incluso los más prometedores presentan efectos secundarios indeseables. Además, muchas enfermedades no responden a tales moléculas, por lo que siguen sin cura ni tratamiento. Incluso los biofármacos, la clase más novedosa de medicamentos (a menudo formados por proteínas fabricadas por células inmunitarias de ratones, conejos y otros animales), suelen basarse en un método abreviado de descubrimiento por ensayo y error.

Un proceso ideal para el desarrollo de fármacos, en vez de buscarlos como una aguja en un pajar, consistiría en diseñar, de forma rápida y racional, moléculas específicas que utilizaran el mismo lenguaje que las células. El ADN y el ARN transmiten a las células muchos mensajes complejos para que fabriquen millones de proteínas a través de un número de etapas asombroso: hay que seleccionar una secuencia concreta de los nucleótidos A, T, C y G en el ADN, transcribir dicha secuencia en una molécula denominada ARN mensajero (ARNm) y, a continuación, leer ese ARNm para organizar las moléculas denominadas aminoácidos en una cadena, de hasta 35.000 unidades, que formará una única proteína.

Los errores como la adición, la eliminación o el cambio de sitio de un nucleótido, como T o G, detendrán la producción de la proteína o generarán una que será irregular, lo que provocará una enfermedad. Demasiadas copias de un ARNm, y, por lo tanto, de su proteína derivada, también llevará a una dolencia.

Pero es posible sintetizar segmentos de ADN o ARN a la medida, denominados oligonucleótidos. Dado que el alfabeto genético tiene normas muy específicas (solo la A puede emparejarse con la T, y la C con la G), podemos fabricar oligonucleótidos con secuencias que se fijen selectivamente a una secuencia iniciadora de la enfermedad. De este modo, la inactivarían y acabarían por empantanar el funcionamiento de la célula, con lo que se detendría la producción de la proteína causante de la dolencia.

EN SÍNTESIS

Los ácidos nucleicos esféricos son un novedoso tipo de nanofármacos constituidos por hebras de ADN o ARN que se disponen en forma de esfera. Actúan específicamente sobre las células alteradas responsables de una enfermedad al unirse a las secuencias genéticas concretas que la desencadenan.

A diferencia de los fármacos a base de ácidos nucleicos lineales, los esféricos tienen más posibilidades de interaccionar con los receptores de las células que les permiten introducirse en ellas, donde se unirán a los ADN o ARN de interés.

Al poder llegar a cualquier parte del organismo, los ácidos esféricos nucleicos tienen la posibilidad de convertirse en tratamientos para algunas de las enfermedades más graves, como los tumores cerebrales.

ADN para tratar ADN

Dentro de una célula, un ADN anómalo —y el ARN mensajero (ARNm) correspondiente, que instruye a la célula lo que debe hacer— puede provocar una enfermedad. Los científicos sintetizan un ADN para que se fije de manera específica a tales moléculas problemáticas. Unen varios ADN en una esfera (ácidos nucleicos esféricos, ANE) que penetra en las células e interfiere con las moléculas que provocan el problema.

Los ANE comienzan con un núcleo, a menudo compuesto por una nanopartícula llamada liposoma. Alrededor de este núcleo se empaqueta densamente el ADN monocatenario sintetizado a la medida.

Nanopartícula central

Anclaje

ADN monocatenario

Los objetos no están dibujados a escala

LIMITACIONES DE LAS MOLÉCULAS LINEALES

Se han probado fármacos con cadenas lineales típicas de ADN o de ARN. Llegan a funcionar, pero a menudo tienen dificultades para entrar en las células o son destruidos por las defensas inmunitarias. Suele ser necesario inyectarlos directamente en el sitio de la enfermedad, lo que limita su utilidad.

Forma lineal (oligonucleótido)

ÉXITO DE LAS ESFERAS

A diferencia del único anclaje que contiene una hebra lineal, los ANE presentan en la superficie numerosas hebras de ADN que interaccionan con los receptores basurero, las puertas de acceso a las células. Por tanto, a estas les resulta más fácil captar las esferas.

Célula destinataria

ARNm sobreexpresado

PROGRESO DE LA ENFERMEDAD

Las moléculas de ARNm asociadas a la enfermedad transmiten las instrucciones para fabricar la proteína indeseada al no encontrar ningún obstáculo.

Proteínas indeseadas

Los fármacos tradicionales basados en moléculas pequeñas actúan selectivamente sobre las proteínas resultantes

Receptores basurero

ARNm capturado

Menos proteínas indeseadas

DETENCIÓN DE LA ENFERMEDAD

Las secuencias de los ANE, creadas a la medida, se fijan solo a los ARNm implicados en la enfermedad e ignoran el resto. Tras su captura, los ARNm ya no conseguirán transmitir las instrucciones para fabricar las proteínas dañinas.

EMILY COOPER

A pesar de que los equipos automáticos fabrican con rapidez oligonucleótidos sintéticos con cualquier secuencia que uno pueda imaginar, apenas se han autorizado una docena de fármacos que los contienen. Ello se debe a que los oligonucleótidos deben superar un obstáculo destacable una vez se inyectan en el torrente sanguíneo: como son foráneos (es decir, no son del paciente), recibirán el mismo trato que un material peligroso o desechable. El sistema inmunitario los destruirá o, si no, las estaciones depuradoras de residuos (el hígado y los riñones) los eliminarán antes de que alcancen su destino. Incluso si las hebras de oligonucleótidos lograran llegar a una célula que contuviera el ARNm de interés, se encontrarían primero con su membrana externa, que actúa de barrera e impide que los oligonucleótidos pasen a su interior. Como resultado, las compañías farmacéuticas que trabajan con estas moléculas a menudo se conforman con tratar las enfermedades que pueden abordarse en el hígado. Aunque se trate de un órgano muy importante, el uso de esos fármacos queda muy limitado por este confinamiento hepático. Otra posible estrategia, como la inyección de los oligonucleótidos directamente en el sitio de la enfermedad (igual que Spinraza se inyecta en la médula espinal), resulta técnicamente difícil y no garantiza que el medicamento entre en las células adecuadas.

UN RESULTADO SORPRENDENTE

Los avances nanotecnológicos realizados por nuestro grupo en la Universidad Noroccidental, junto con otros investigadores, nos han llevado a los ANE, que podrían solventar este problema. Antes de 2006, nos dedicábamos a aprovechar su altísima especificidad de fijación para diseñar sondas diagnósticas ultrasensibles (por ejemplo, para «pescar» segmentos de ADN de cáncer en muestras de sangre). Estas consistían en una nanopartícula de oro a la que le uníamos numerosas hebras de ADN diseñadas para que se anclasen a ella por un extremo, con lo que se obtenía el patrón de púas del erizo de mar. El extremo exterior del ADN se diseñaba para que tuviera la secuencia complementaria al ADN del cáncer, por lo que funcionaba bastante bien como sonda. También utilizamos estas esferas como átomos artificiales con enlaces programables para forjar nuevos tipos de materiales. Sin embargo, el diseño de fármacos no se hallaba realmente en nuestro punto de mira porque, de acuerdo con el paradigma dominante de la biología y de la química de los fármacos, el ARN y el ADN no lograrían atravesar las membranas celulares.

No obstante, sentíamos curiosidad por saber cómo interaccionarían los ácidos nucleicos con los sistemas vivos en esta nueva disposición espacial. Ya sabíamos que los desarrolladores de fármacos habían tenido poco éxito en sus experimentos con oligonucleótidos monocatenarios. De nuestra experiencia con los ANE como plataforma diagnóstica, sabíamos que el ADN y el ARN de interés se fijarían a nuestras aglomeraciones de púas con mucha más fuerza de lo que lo harían a las hebras oligonucleotídicas libres, porque nuestras púas están densamente empaquetadas en la superficie de la nanopartícula. Esto las hace más rígidas, lo que ayuda a que las A, T, G y C de cada hebra se alineen y fijen con la hebra destinataria cuando se topen con ella. Dicha característica nos hizo sospechar que, si tenían la secuencia nucleotídica correcta, los ANE podrían convertirse en un fármaco oligonucleotídico muy potente.

Para comprobar esa idea, llevamos a cabo un experimento que, en ese momento, pensábamos que tenía pocas posibilidades de funcionar. Tomamos dos tubos de ensayo que contenían células de ratón: en uno introdujimos hebras de oligonucleótidos libres, y en el otro, numerosos ANE. A las hebras y a las esferas les unimos moléculas con fluorescencia roja para facilitar su seguimiento. Cuando miramos al microscopio, las células que se mezclaron con las hebras libres aparecían transparentes, tal y como esperábamos, porque los oligonucleótidos libres no atravesaban la membrana. Pero las mezcladas con los ANE brillaban en la pantalla con fluorescencia roja: ¡las esferas habían entrado!

¿Cómo lo había logrado? En general, las membranas celulares controlan con rigor las moléculas que entran, y los oligonucleótidos no suelen encontrarse entre las admisibles. Además, los oligonucleótidos y la superficie celular están cargados negativamente, por lo que deberían repelerse al igual que dos imanes. Por si fuera poco, cuando repetimos este experimento una y otra vez con más de 50 tipos de células de humanos y de animales, todas excepto una se ponían rojas, en señal de éxito.

Hoy día creemos saber cuál es la vía de entrada: un tipo de molécula denominada receptor basurero (*scavenger receptor*) que salpica la superficie celular. Estos receptores son muy importantes cuando una célula se relaciona con su entorno; le permiten, por ejemplo, aceptar las biomoléculas nanométricas que necesita. Algunos rasgos estructurales de los extremos de las púas de los ANE imitan los sustratos naturales de estos receptores basurero. Como se indicó más arriba, las hebras de las esferas están densamente empaquetadas y, al igual que el velcro, cuantos más ganchos haya, más fuerte será la fijación. Las hebras libres se escaparían, incluso si los receptores basurero las reconocieran como moléculas que captar, porque solo habría un gancho para sujetarlas.

Con la ayuda de un microscopio electrónico observamos que, cuando un ANE se fijaba a estos receptores, la membrana celular circundante se invaginaba para crear un bolsillo que introducía el ANE en la célula.

LAS ESFERAS COMO MEDICAMENTO

Pero la introducción de las esferas era tan solo la mitad de la batalla. Para que sirva de fármaco, el ANE tiene que toparse con el tramo del ARNm que da las instrucciones a la célula para fabricar una proteína asociada a la enfermedad, tras lo cual debe fijarse a él e inactivarlo.

El primer segmento de ARNm celular sobre el que actuamos selectivamente no provocaba ninguna enfermedad, sino que transmitía las instrucciones para sintetizar una proteína que brillaba en verde al microscopio. Nuestro objetivo consistía, pues, en detener este ARNm. Observamos una clara diferencia de color entre las células de ratón expuestas a un ANE diseñado para emparejarse con ese ARNm verdeante y las que no contenían las esferas. Las segundas eran de un verde brillante, lo que demostraba que el ARNm había codificado la proteína. En cambio, las expuestas a nuestros ANE eran transparentes, lo que significaba que habíamos bloqueado el ARNm antes de que pudiera transmitir las instrucciones del verdeo, como describimos en *Science* en 2006.

A continuación, enfrentamos los ANE al principal inconveniente de los fármacos a base de oligonucleótidos lineales: su destrucción en manos del sistema de defensa natural del organismo. Encontramos que nuestras esferas tenían una carga eléctrica fuerte (de nuevo debido a la densidad del empaquetamiento) que las ayudaba a evadir la injerencia inmunitaria. Esta concentración de cargas mantenía alejadas las moléculas defensoras denominadas nucleasas (proteínas que degradan el ADN y el ARN foráneo).

LA PRUEBA DEL ALGODÓN

Teníamos algo con muy buena pinta, al menos en el laboratorio. Otros científicos repitieron parte de nuestro trabajo y obtuvieron avances de modo independiente: la dermatóloga Amy Paller, el experto en la AME Arthur Burghes, el especialista en inmunoterapias Bin Zhang, el biólogo del cáncer Alex Stegh, el cirujano de trasplantes Jason Wertheim y la oncóloga Priya Kumthekar. Pero el camino desde el laboratorio hasta la clínica es largo y trabajoso, por lo que, hace casi diez años, algunos investigadores de nuestro grupo fundaron una empresa llamada Exicure para desarrollar el uso clínico de los fármacos a base de ANE.

Exploramos inicialmente si podían administrarse a los tejidos enfermos en forma de cremas tópicas y colirios, gracias a que las células captan los ANE con facilidad y suponen una gran mejora sobre las estrategias invasivas, como las inyecciones directas. Dos de las primeras afecciones con las que trabajamos fueron la psoriasis y las heridas de mala cicatrización. Algunos ANE prometedores se hallan en las primeras etapas de ensayos clínicos para varias de estas dolencias.

El tratamiento de la piel es relativamente fácil. Pero el del cerebro no, porque está defendido por un sistema inmunitario vigilante y la barrera hematoencefálica (una malla de vasos sanguíneos diseñada para impedir el paso de moléculas foráneas). En consecuencia, los tumores cerebrales, como el glioblastoma, son particularmente difíciles de tratar. Sin embargo, pensábamos que los ANE franquearían estas defensas por las mismas puertas moleculares por las que atravesaban la membrana celular. Una vez en el cerebro, las esferas podrían centrarse en las células cancerosas y actuar selectivamente sobre algún gen o proteína responsable de mantener las células vivas, que las neoplasias suelen sintetizar en gran cantidad.

Para comenzar con este proyecto, creamos un fármaco con ANE a partir de muchos pedacitos de ARN diseñados específicamente para reprimir la producción de la proteína Bcl2L12 en las células del glioblastoma. Esta proteína actúa de defensa bioquímica para que las células cancerosas sigan funcionando. Pensábamos que al interceptar el ARNm que gobierna la fabricación de dicha proteína, los ANE podrían hacer que el cáncer se volviera vulnerable a los medicamentos tradicionales. De hecho, en nuestros estudios con animales, descritos en 2013 en *Science Translational Medicine*, observamos que los ANE inyectados en el torrente sanguíneo de los ratones alcanzaban el cerebro, atravesaban la barrera hematoencefálica e impedían la producción de la proteína Bcl2L12 en las células del glioblastoma. El pasado año, los primeros resultados clínicos demostraban que estos ANE también llegaban a las células del glioblastoma en los pacientes humanos, aunque no se curaban. Todavía nos queda por comprobar si los ANE aumentan la vulnerabilidad de las células cancerosas. Aun así, la capacidad que tienen para alcanzar el cerebro y su ausencia de toxicidad nos animan a pensar que conseguiremos tratar este cáncer, así como otros trastornos neurológicos, y lograremos sentar las bases para la siguiente serie de ensayos clínicos. Los estudios con otras enfermedades, como la atrofia muscular espinal, resultan prometedores en los animales.

Otra aplicación fascinante de los ANE es como inmunoterapia contra el cáncer. Las células cancerosas a menudo tienen proteínas en la membrana que son diferentes a las de las células sanas, por lo que podrían hacer de señuelo. Si conseguimos entrenar el sistema inmunitario para que actúe contra una proteína de una célula cancerosa del mismo modo que persigue al virus de la gripe, nuestro propio organismo podrá protegernos mejor de la enfermedad.

Para fabricar una vacuna de ANE contra el cáncer, cambiamos el núcleo de oro de la nanopartícula por uno hueco denominado liposoma, lo rellenamos con uno de estos señuelos proteicos y lo inyectamos en animales con el correspondiente cáncer. Algunos de nuestros experimentos más recientes, publicados en 2019 en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, han demostrado que tales ANE desencadenan una respuesta inmunitaria inmediata contra el tumor, por lo que parece que enseñan al sistema inmunitario a perseguir las células que presentan el señuelo. Los efectos también parecen duraderos: después de que los ANE se hayan esfumado, el sistema inmunitario sigue acosando a las células que exponen esa proteína. Los ANE ya están mostrando su potencia e inocuidad en los ensayos clínicos de fase I con humanos, y se están analizando otras esferas que actúan selectivamente sobre un cáncer de piel mortal en una serie independiente de ensayos de inocuidad.

No obstante, no se ha autorizado el uso farmacológico de los ANE porque les quedan muchos retos que superar. Ya que las esferas acaban llegando a una amplia gama de células, necesitamos estudiar con calma si producen o no algún efecto negativo inespecífico, a pesar de que, por diseño, actúen solo sobre los ADN y ARN problemáticos. Deben explorarse poblaciones más grandes de pacientes y necesitamos mejorar su acción selectiva para incrementar la cantidad de fármaco que llega al órgano afectado y a sus células.

Pensamos que la capacidad que tienen los ANE para acceder a tantos tejidos diferentes es algo revolucionario que resultará decisivo para la aparición y, en última instancia, el uso generalizado de tales medicamentos. Los ANE se han desarrollado gracias a tres avances principales: la capacidad para fabricar grandes cantidades de oligonucleótidos, el conocimiento de las rutas genéticas en las enfermedades, y la capacidad para introducir tales oligonucleótidos en los tejidos y células relevantes. Los primeros son importantes, pero, sin el tercero, el proceso sería como crear programas informáticos sin el ordenador necesario para ejecutarlos. Los ANE pueden ser ese ordenador versátil e importante, una plataforma con la que se podría hacer frente a numerosas dolencias. Podrían evitarle a la industria farmacéutica la difícil búsqueda de moléculas nuevas para cada nuevo tratamiento. Un ANE simplemente necesita un conjunto de oligonucleótidos diferente para que pueda vencer cualquier enfermedad que se descubra. Y no hemos hecho más que empezar. IyC

Artículo producido por *Scientific American y Nature* con la colaboración del Centro Médico de la Universidad de Pittsburgh

PARA SABER MÁS

Oligonucleotide-modified gold nanoparticles for intracellular gene regulation. Nathaniel L. Rosi et al. en *Science*, vol. 312, n.º 5776, págs. 1027-1030, mayo de 2006.

Spherical nucleic acid nanoparticle conjugates as an RNAi-based therapy for glioblastoma. Samuel A. Jensen et al. en *Science Translational Medicine*, vol. 5, n.º 209, págs. 209ra152, octubre de 2013.

Rational vaccinology with spherical nucleic acids. Shuya Wang et al. en *PNAS*, vol. 116, n.º 21, págs. 10473-10481, mayo de 2019.

EN NUESTRO ARCHIVO

Fármacos basados en ADN. Matthew P. Morrow y David B. Weiner en *IyC*, septiembre de 2010.

Bengalas para detectar el cáncer. Joshua A. Krisch en *IyC*, junio de 2015.

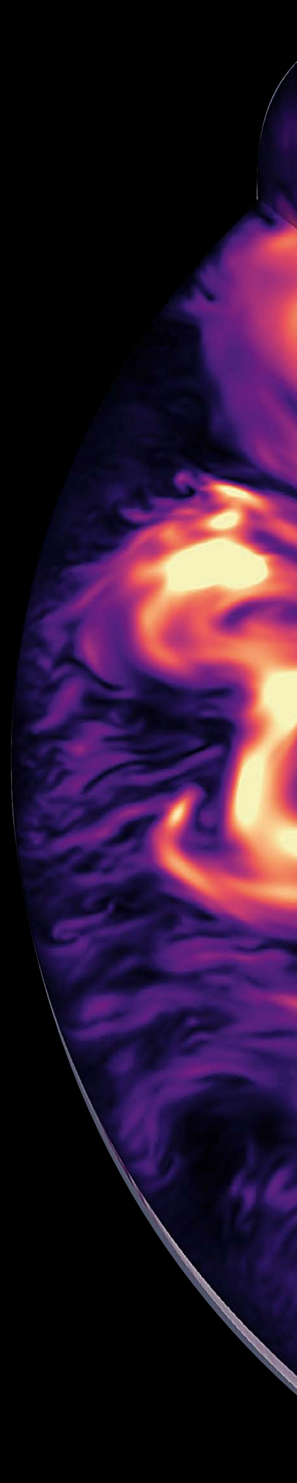
Cuando nuestras defensas se vuelven contra los fármacos. Michael Waldholz en *IyC*, marzo de 2018.

GEOFÍSICA

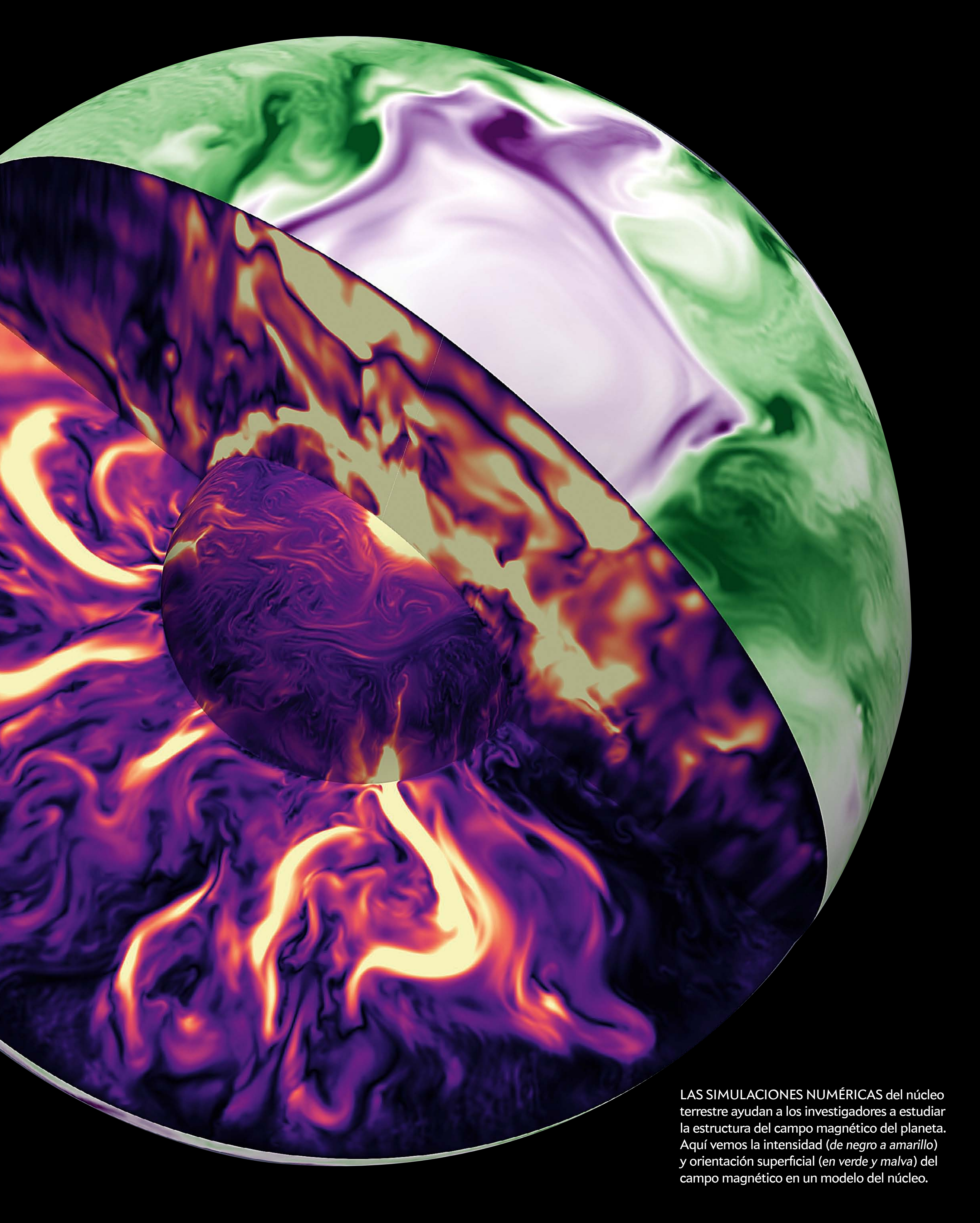
La dinamo terrestre, un desafío centenario

Hace cien años, Joseph Larmor propuso que el campo magnético de la Tierra se debía a un efecto dinamo generado por el movimiento del hierro líquido en el núcleo del planeta. Cálculos teóricos, simulaciones y experimentos parecen confirmarlo

Emmanuel Dormy



© NATHANAËL SCHAEFFER



LAS SIMULACIONES NUMÉRICAS del núcleo terrestre ayudan a los investigadores a estudiar la estructura del campo magnético del planeta. Aquí vemos la intensidad (*de negro a amarillo*) y orientación superficial (*en verde y malva*) del campo magnético en un modelo del núcleo.

Emmanuel Dormy es director de investigación del Centro Nacional de Investigación Científica de Francia en la Escuela Normal Superior de París y profesor en la Escuela Politécnica de Palaiseau.



Todos hemos jugado alguna vez con una brújula. Es una experiencia simple pero fascinante. La aguja se orienta sistemáticamente en una dirección privilegiada, el «norte». Al desviarla, oscila y recupera su posición inicial, y si la acercamos a un imán, fluctúa de manera rápida y termina por orientarse hacia él. Estos fenómenos no dejan de sorprendernos y despertar nuestra curiosidad científica. En su autobiografía, Albert Einstein escribió que, a la edad de cuatro o cinco años, estando enfermo, su padre le regaló una brújula. El objeto lo cautivó: «El que la aguja se comportara de una forma tan precisa sin que nadie la tocara no encajaba dentro de mis esquemas de comprensión del mundo [...] Recuerdo, o creo recordar, que aquel suceso dejó en mí una impresión honda y duradera. Tenía que haber un orden oculto tras la apariencia de las cosas». Este afán por comprender llevó al joven Einstein a realizar descubrimientos espectaculares. Pero ¿qué se esconde tras esa brújula tan fascinante?

En el siglo iv antes de nuestra era, los chinos ya usaban un «indicador del sur» para orientarse (las brújulas chinas indicaban esa dirección). En la época Han, las brújulas consistían en cucharas de magnetita (un óxido de hierro que presenta imanación permanente) con el mango apuntando al sur. Hay que esperar hasta el siglo xi para encontrar las primeras referencias al uso de brújulas en navegación. Más tarde, la innovación técnica se extendería a Europa, donde se menciona por primera vez en la obra *De naturis rerum*, escrita alrededor de 1190 por el filósofo inglés Alexander Neckam.

Hoy sabemos que la orientación de la brújula guarda relación con la existencia de un campo magnético global a escala planetaria. Sin embargo, el origen de ese campo fue un misterio durante mucho tiempo e intrigó a numerosos eruditos, como René Descartes, Edmond Halley o André-Marie Ampère. Pero hace poco más de cien años, en 1919, el británico Joseph Larmor sentó las bases que explican el campo magnético de nuestro planeta. Desde entonces, nuestra comprensión de la dinamo terrestre ha avanzado notablemente gracias a esfuerzos tanto teóricos y matemáticos como experimentales y numéricos.

El interés de estudiar la dinamo terrestre no se limita a la Tierra. Otros planetas, las estrellas e incluso las galaxias poseen campos magnéticos con mecanismos subyacentes similares. Por lo tanto, la Tierra constituye un buen modelo para comprender este fenómeno complejo.

LA TIERRA, ¿UN IMÁN GIGANTE?

Los primeros experimentos sistemáticos sobre el campo magnético terrestre se atribuyen a William Gilbert, astrónomo inglés que hacia 1600 trató de esclarecer la causa de la alineación de las brújulas. Lo más natural sería suponer que la Tierra alberga en su centro un enorme imán; de este modo, las líneas del campo magnético emergerían de la superficie en el hemisferio sur, ascendiendo hacia el hemisferio norte a lo largo de los meridianos antes de volver a sumergirse en el planeta. A fin de verificar esta hipótesis, el erudito inglés concibió un imán esférico al que denominó *terrella* («pequeña Tierra», en latín). Al aproximar una brújula, la aguja apuntaba hacia el polo norte de la esfera. También reparó en el hecho de que la aguja no permanecía horizontal con respecto al suelo, sino que se inclinaba al señalar el norte.

EN SÍNTESIS

Los movimientos en el núcleo de hierro líquido de la Tierra producen un efecto dinamo que constituye el origen del campo magnético del planeta.

Aunque Joseph Larmor explicó las claves de este mecanismo hace ya cien años, sigue constituyendo un área activa de investigación en la frontera entre la geofísica, las matemáticas y la física experimental.

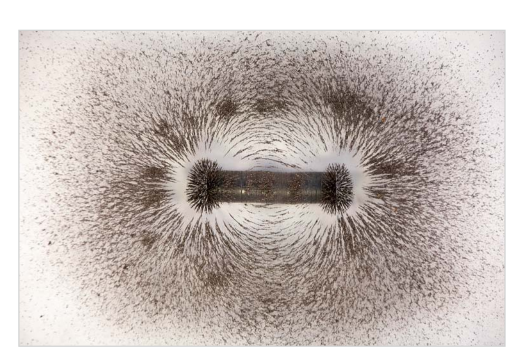
Los futuros experimentos servirán para comprender mejor los procesos que generan el campo magnético terrestre y la dinámica de la inversión de los polos.

Representar el campo magnético

La fuerza que orienta la brújula actúa a distancia, sin estar en contacto con la aguja. Aunque pueda parecer misterioso, es lo mismo que ocurre con la fuerza gravitatoria cuando saltamos en el aire. Esto nos sorprende menos porque experimentamos la gravedad desde nuestra infancia.

El paralelismo entre la gravedad y el magnetismo no acaba aquí. Para estudiar ambas fuerzas, empleamos la noción de campo. Un campo indica la intensidad de una magnitud en todos los puntos del espacio, como la temperatura o la velocidad del viento en un mapa meteorológico. Para el viento también hay que especificar una dirección, por lo que recurrimos a un campo vectorial. Lo mismo ocurre con el campo gravitatorio: hay que señalar en qué dirección actúa la fuerza en cada punto (hacia el centro de la Tierra, simplificando). En el caso del campo magnético, la dirección del vector indica hacia dónde se orientaría una brújula imaginaria situada en ese punto, mientras que su longitud representa la intensidad de la fuerza.

La intensidad de la gravedad disminuye a medida que nos alejamos de la Tierra, mientras que en la superficie es aproximadamente constante. Podemos medirla desplazando un péndulo de su posición de equilibrio. Si la amplitud de las oscilaciones no es demasiado grande, el período solo depende de la longitud del péndulo y de la aceleración local de la gravedad (el éxito de los relojes de péndulo en el siglo XIX se basó en este hecho).



Del mismo modo, al separar la aguja de la brújula de su posición de equilibrio, oscila con un período que depende de la intensidad local del campo magnético: cuanto mayor sea esta, más rápido se moverá la aguja. Así es como Carl Friedrich Gauss efectuó las primeras medidas de la intensidad del campo magnético terrestre en 1832. Para un pequeño imán, podemos visualizar el campo magnético con la ayuda de limaduras de hierro (*imagen*).

Pero, si bien la idea de un imán gigante (es decir, un dipolo magnético con un polo sur y un polo norte) explica el comportamiento de una brújula, el modelo resulta demasiado simple y no da cuenta de las variaciones del campo magnético terrestre a lo largo del tiempo. En efecto, en 1634, Henry Gellibrand, profesor de astronomía del Colegio Gresham de Londres, demostró que el polo norte magnético señalado por la brújula (que hoy correspondería, aproximadamente, al polo sur del dipolo) se desplazaba. Había medido una declinación (el ángulo entre el polo norte magnético y el polo norte geográfico definido por el eje de rotación de la Tierra) de 4,1 grados hacia el este. Sin embargo, las medidas de sus predecesores indicaban una declinación de 6 grados este en 1622 y de 11,3 grados este en 1580. Asumiendo que esos datos eran fiables, Gellibrand concluyó que el campo magnético terrestre evolucionaba con el tiempo, a diferencia del generado por un dipolo simple.

La segunda razón que permite excluir la posibilidad de un imán gigante es más fundamental. Desde que Pierre Curie presentó su tesis doctoral en 1895, sabemos que, por encima de una cierta «temperatura de Curie» (que por lo general es de varios cientos de grados), los materiales ferromagnéticos como la magnetita pierden su imanación permanente a causa de la agitación térmica. Sin embargo, en el interior de la Tierra la temperatura aumenta rápidamente con la profundidad (lo que se conoce como «gradiente geotérmico») y se estima que en el núcleo es de varios miles de grados, muy por encima de la temperatura de Curie del hierro. Es imposible que exista un imán permanente en tales condiciones.

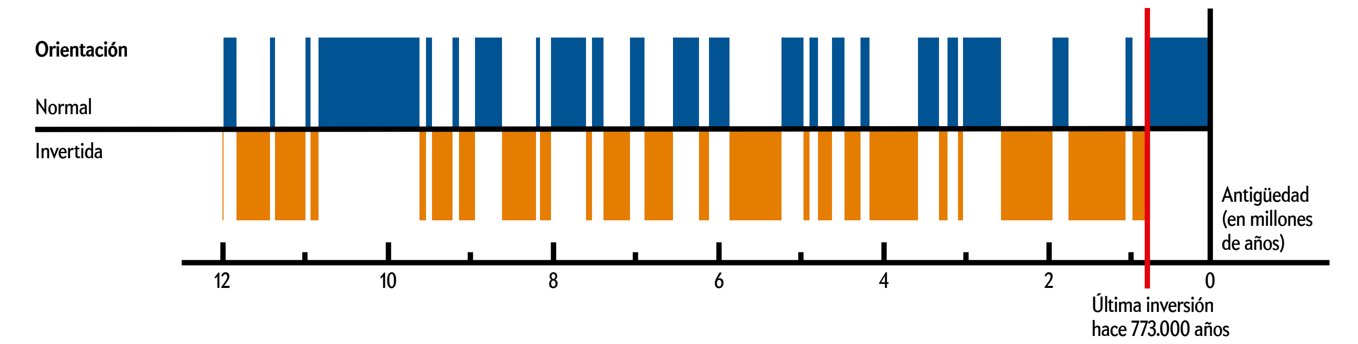
Entonces, ¿de dónde procede el campo magnético terrestre? En el siglo XIX, Ampère propuso una nueva idea basada en los experimentos de Hans Christian Ørsted, que en 1820 había descubierto una relación entre la electricidad y el magnetismo. El físico danés demostró que, al hacer circular una corriente eléctrica en un conductor, la aguja de una brújula cercana se desviaba: las corrientes eléctricas producen campos magnéticos. Dos años más tarde, Ampère postuló que el magnetismo terrestre estaba vinculado a corrientes eléctricas en el interior de la Tierra: «La idea más simple, y que se le ocurriría de inmediato a cualquiera que quisiera explicar la dirección constante de la aguja, ¿no sería admitir que en la Tierra existe una corriente eléctrica [...] perpendicular al meridiano magnético?». Sin embargo, aún faltaba determinar el origen de dicha corriente.

¿Podía tratarse de una corriente momentánea? Según los cálculos, una corriente eléctrica no alimentada se disiparía en forma de calor en unos diez mil años debido a la resistividad eléctrica del planeta. Sin embargo, los registros geológicos demuestran que la Tierra posee un campo magnético desde hace miles de millones de años.

Esos registros consisten en coladas volcánicas que contienen minerales de hierro, como la magnetita. Al enfriarse el flujo, produce rocas cuya imanación se orienta en la dirección del campo magnético de la época y lugar en que se produjo la colada (en los sedimentos de los fondos lacustres ocurre un mecanismo análogo). En 1906, el geofísico francés Bernard Brunhes halló algo sorprendente: las coladas sucesivas en un mismo emplazamiento indicaban que el norte geomagnético en ocasiones estaba próximo al norte geográfico, y en otras, al sur geográfico. Acababa de descubrir las inversiones del campo magnético terrestre. Aunque tuvo que pasar más de medio siglo para que toda la comunidad científica aceptara su hallazgo, hoy es una idea bien asentada: el campo magnético de la Tierra se ha invertido en múltiples ocasiones a lo largo de su historia.

EL VALS DEL CAMPO MAGNÉTICO

Tales inversiones se producen de forma irregular. Aunque, en promedio, los períodos duran cientos de miles de años, el planeta



EL CAMPO MAGNÉTICO DE LA TIERRA se ha invertido en muchas ocasiones a lo largo de la historia. El polo norte del imán terrestre se encuentra unas veces cerca del polo norte geográfico y otras cerca del polo sur geográfico. Esta última configuración es la actual, y nos referimos a ella como «normal». El estudio de las rocas volcánicas permite establecer la cronología de las épocas en las que el campo presentaba una orientación normal (*azul*) o invertida (*naranja*).

también ha conocido épocas de más de 30 millones de años sin inversión. La última tuvo lugar hace 773.000 años. La duración de una inversión puede determinarse, o bien por la lenta disminución de intensidad magnética que la precede, o bien por el cambio de dirección, que es más rápido. En 2012, el equipo de Jean-Pierre Valet, del Instituto de Física del Globo de París, llegó a la conclusión de que esta última etapa duraba unos 1000 años. En 2019, Brad Singer, de la Universidad de Wisconsin, y sus colaboradores argumentaron que la última inversión podría haberse alargado hasta 22.000 años. Harán falta más análisis para zanjar el debate.

La última inversión se produjo hace 773.000 años y el período de transición duró varios milenios

En conjunto, las observaciones sugieren que el origen del campo magnético terrestre obedece a un mecanismo complejo. Fue Joseph Larmor, profesor de la Universidad de Cambridge, quien finalmente halló la solución en 1919. Larmor propuso un mecanismo que convierte parte de la energía mecánica asociada al movimiento de un fluido conductor en energía eléctrica y, por lo tanto, en un campo magnético. Su razonamiento no recurre a ningún imán permanente para generar las corrientes eléctricas, y fue innovador ya que se basa en una inestabilidad. La idea es que la interacción del fluido en movimiento con un pequeño campo magnético o una pequeña corriente eléctrica que pudieran estar presentes de forma accidental produce una corriente eléctrica y un campo magnético que se refuerzan y mantienen mutuamente. Se trata del efecto de la dinamo autoexcitada o autoinducida (*veáse el recuadro* «El papel de la inestabilidad»).

Inicialmente Larmor aplicó su idea al Sol, dado que la existencia de movimientos fluidos en su seno ya se conocía a comienzos del siglo xx. Sin embargo, observó que el mecanismo también sería aplicable a la Tierra si su interior fuese fluido. En aquella época los geofísicos ya habían demostrado, gracias a las ondas sísmicas, que el planeta presenta un núcleo distinto del manto. Pero todavía hubo que esperar un decenio para saber que una parte del núcleo se halla en estado líquido.

Durante su formación, la Tierra se dividió en capas: el hierro (más denso) se acumuló en el centro del planeta y dio lugar al núcleo, que quedó rodeado de un manto rocoso menos denso. A unos 3000 kilómetros bajo nuestros pies, ese núcleo está constituido en un 80 por ciento por hierro fundido, mezclado con otros elementos más ligeros (sobre todo níquel), y el conjunto se encuentra a una temperatura de varios miles de grados. Debido a las presiones extremas, en el centro se formó un nucleo interno sólido de hierro prácticamente puro. El efecto dinamo surgiría en la parte líquida del núcleo.

UN MOVIMIENTO EFICAZ

Dado que la Tierra se enfría desde la superficie, presenta un gradiente radial de temperatura. En consecuencia, el hierro líquido más profundo está más caliente y es menos denso que el más próximo al manto. Eso genera movimientos de convección: el hierro líquido más caliente se desplaza hacia arriba debido al empuje de Arquímedes, y el más frío desciende.

A ello se añade una convección relacionada con la composición: a medida que se enfría el planeta, el radio del núcleo interno sólido aumenta lentamente. El hierro cristaliza, mientras que los elementos más ligeros permanecen en la parte líquida del núcleo; pero, debido a su menor densidad, ascienden hacia el manto y contribuyen al movimiento de convección. Además, la cristalización del núcleo interno libera calor, lo que amplifica el efecto de la convección térmica en el núcleo líquido.

La rotación de la Tierra y la fuerza (ficticia) de Coriolis asociada a ella también influyen. En ausencia de un campo magnético, esta fuerza obliga al fluido en convección a organizarse en «ciclones y anticiclones», y se opone a cualquier variación de velocidad en la dirección del eje de rotación del planeta. Como resultado, el fluido se estructura en una serie de «rodillos» o columnas giratorias paralelas al eje de rotación (*véase el recuadro* «Columnas de hierro líquido en el centro de la Tierra»). El número y el diámetro de estas columnas dependen de diversos factores, como la viscosidad del hierro líquido y la intensidad de los movimientos.

Los investigadores suelen usar simulaciones numéricas para estudiar la dinamo terrestre. Pero las características de la Tierra dificultan la construcción de modelos realistas. Cuando ciertos parámetros adimensionales son pequeños, los efectos de algunos términos sobre el flujo aparecen a escalas minúsculas. Eso obliga a realizar más cálculos y a emplear recursos informáticos más potentes para obtener simulaciones realistas. Por lo tanto, es indispensable recurrir a la computación de alto rendimiento, es decir, al «paralelismo masivo» (un enorme número de procesadores trabajando en paralelo).

Columnas de hierro líquido en el centro de la Tierra

Para que funcione la dinamo terrestre, el hierro líquido del núcleo de la Tierra debe estar en movimiento. Eso ocurre gracias a la convección térmica: el líquido más profundo, al estar más caliente, es menos denso y tiende a ascender a la superficie, mientras que el hierro más frío se hunde. A medida que el núcleo se enfría, el crecimiento de la parte interna sólida también contribuye a los movimientos convectivos. Para describir este proceso hay que tener en cuenta la rotación de la Tierra, que genera una fuerza inercial. Esta fuerza de Coriolis estructura los movimientos de convección del hierro líquido en columnas paralelas al eje de rotación del planeta. A medida que se intensifica el campo magnético producido por el efecto dinamo, las fuerzas asociadas a él compiten con la de Coriolis y destruyen la estructura.

LA ROTACIÓN DE LA TIERRA ESTRUCTURA LA CONVECCIÓN

La fuerza (ficticia) de Coriolis, vinculada a la rotación de la Tierra, es más conocida por estructurar las masas de aire y los ciclones. Pero lo mismo ocurre con el hierro líquido del núcleo terrestre. El fluido en convección se organiza en «ciclones y anticiclones» que giran en sentidos opuestos. Por efecto de la rotación, los movimientos se alinean de forma que son invariables en la dirección del eje de rotación de la Tierra. Como resultado, el fluido se estructura en columnas.

Eje de rotación de la Tierra
Eje del dipolo magnético
Núcleo externo líquido
Columna de convección
Movimiento del hierro líquido
Línea del campo magnético
Eje de rotación de la Tierra
Núcleo externo líquido
Manto
Corteza
Eje del dipolo magnético
Núcleo interno sólido
Eje de rotación de la Tierra

UNA SIMULACIÓN REALISTA DE LA CONVECCIÓN

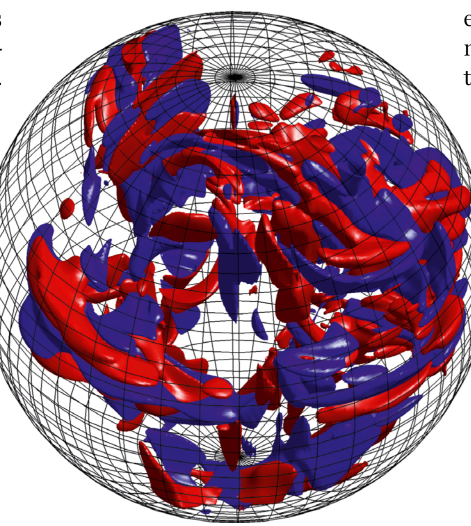
Las simulaciones numéricas permiten comprender mejor la estructura de las columnas en ausencia de un campo magnético. En 2019, Céline Guervilly, de la Universidad de Newcastle, y sus colaboradores realizaron una simulación con los parámetros más realistas posibles. La imagen muestra un corte ecuatorial y otro meridional y los colores indican la velocidad de rotación del fluido en sentido horario y antihorario. Las columnas poseen un diámetro típico de unos 30 kilómetros y se reparten en múltiples capas concéntricas. Aquí no se aprecia un núcleo interno sólido, dado que los investigadores estudiaban la dinámica previa a su formación y a la aparición del campo magnético.

ASSYA PALOMA/*POUR LA SCIENCE* (*capas de la Tierra y columnas de convección*); FUENTE: «TURBULENT CONVECTIVE LENGTH SCALE IN PLANETARY CORES», POR CÉLINE GUERVILLY ET AL. EN *NATURE*, VOL. 570, PÁGS. 368-371, JUNIO DE 2019 (*simulación*)

Por ejemplo, se pensaba que el diámetro de las columnas convectivas dependía principalmente de la viscosidad del fluido y era del orden de una decena de metros, en contraste con el diámetro de varios miles de kilómetros del núcleo. Pero en 2019, Céline Guervilly, de la Universidad de Newcastle, y sus colaboradores demostraron mediante simulaciones numéricas que es más bien la amplitud de los movimientos, y no la viscosidad, la que determina las dimensiones de las columnas. Concluyeron que su diámetro era de unos 30 kilómetros, lo que mitiga el problema de las escalas y abre la puerta a modelos más realistas y menos costosos computacionalmente.

Pero, a pesar de que los ordenadores son cada vez más potentes, los parámetros de las simulaciones siguen difiriendo bastante de los del núcleo fluido de la Tierra. No obstante, los investigadores tratan de usar sus modelos para deducir ciertas características robustas del campo magnético y acercarse a un régimen lo más realista posible.

Las simulaciones numéricas han revelado la posibilidad de generar el efecto dinamo en algunos modelos del núcleo líquido terrestre. Así pues, parece que tenemos todos los elementos de la teoría de Larmor. Una vez puesta en marcha la dinamo, la intensidad del campo magnético aumenta hasta que la fuerza de Laplace que ejerce dicho campo sobre el fluido conductor se iguala a la fuerza de Coriolis. Se obtiene entonces un régimen de equilibrio donde el campo magnético compensa las restricciones de la rotación rápida: las columnas de convección desaparecen, como se observa en mis simulaciones de 2016 (*véase la figura de esta misma página*).



UNA VEZ PUESTA EN MARCHA LA DINAMO, sobre el hierro líquido del núcleo actúan las fuerzas de Coriolis (*arriba*) y de Laplace (*abajo*). Estas simulaciones del autor, en las que dichas fuerzas se representan mediante isosuperficies (valores positivos en rojo y negativos en azul), muestran cómo ambas tienden a equilibrarse.

© EMMANUEL DORMY

UN SISTEMA NO LINEAL

Ese tipo de simulaciones se basan en ecuaciones que se resuelven mediante métodos numéricos aproximados y cuyo estudio riguroso supone un reto para los matemáticos. El análisis de dichas ecuaciones comenzó tras la Segunda Guerra Mundial, cuando el físico de origen alemán Walter Elsasser introdujo su forma moderna, expresándolas como un sistema de ecuaciones magnetohidrodinámicas que describen la inestabilidad propuesta por Larmor. El sistema consta de tres ecuaciones: la de Navier-Stokes (intrínsecamente no lineal), que gobierna el movimiento del fluido; la de inducción magnética, que describe la formación del campo magnético y los efectos de la inducción; y una tercera ecuación relacionada con las transferencias de calor en el seno del fluido. El sistema formado por estas tres ecuaciones es difícil de resolver, porque no es lineal (en particular, porque el movimiento del fluido genera un campo magnético que, a su vez, actúa sobre el flujo del hierro líquido mediante la fuerza de Laplace).

Como en el caso de las simulaciones numéricas, parte de la dificultad para resolver estas ecuaciones reside en los valores de sus parámetros, asociados a ciertas características —en ocasiones extremas— de la Tierra. Por ejemplo, la fuerza de Coriolis es varios miles de millones de veces más intensa que las fuerzas asociadas a la viscosidad del fluido. Tales diferencias de escala también se observan en la evolución temporal: la rotación de veinticuatro horas de la Tierra influye de manera evidente en la generación del campo geomagnético (confiriéndole su estructura principalmente dipolar y alineada en promedio con el eje de rotación del planeta), pero la evolución de este presenta tiempos característicos del orden de siglos o incluso mayores (como en el caso de las inversiones de la polaridad). Estas diferencias de escala dificultan sobremanera el estudio de las ecuaciones.

ECUACIONES RÍGIDAS

Si despreciamos, en primera aproximación, todos los parámetros pequeños (las cantidades adimensionales menores que una millonésima), obtenemos unas ecuaciones simplificadas que, sin embargo, aún no sabemos resolver en general. Ni siquiera se ha demostrado que posean soluciones «regulares», es decir, físicamente aceptables y sin anomalías como, por ejemplo, oscilaciones infinitamente rápidas. Obtener la solución en este límite, denominado «estado de Taylor» (por el físico británico John Bryan Taylor, quien lo introdujo en 1963), aún supone un formidable desafío matemático.

En 2015, Paul Roberts y Cheng-Chin Wu, de la Universidad de California en Los Ángeles, desarrollaron los primeros modelos numéricos aplicados al estado de Taylor, para una configuración simplificada. En 2017, Isabel Gallagher, de la Escuela Normal Superior de París, y David Gérard-Varet, de la Universidad París-Diderot, estudiaron la regularidad matemática de un caso particular del estado de Taylor, considerando una linealización de las ecuaciones y una geometría idealizada. Sorprendentemente, al reintroducir los pequeños parámetros que habíamos ignorado (lo que se conoce como desarrollo asintótico), pueden obtenerse soluciones. Pero las ecuaciones de estos sistemas «rígidos» siguen siendo muy difíciles de estudiar.

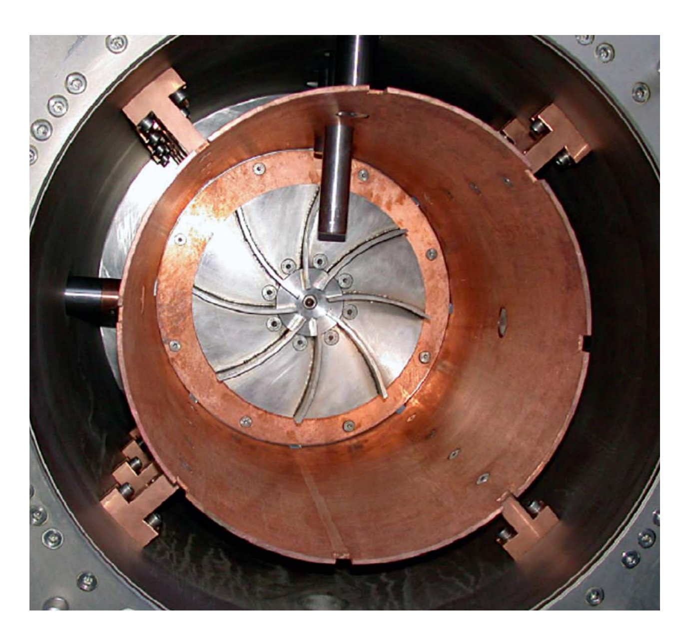
En 2015, Michael Calkins, de la Universidad de Colorado en Boulder, y un equipo internacional combinaron las estrategias asintótica y numérica en el caso de un campo magnético bastante débil. En 2016, desarrollé una simulación de dinamo en el límite de campo intenso (es decir, cuando el campo magnético

se equilibra con la fuerza de Coriolis) a la que ya me he referido anteriormente. Distintos equipos de todo el mundo siguen en busca de los parámetros más realistas posibles.

Otro enfoque se basa en la demostración experimental del efecto de la dinamo autoexcitada. Se trata de una tarea compleja, puesto que requiere poner en movimiento grandes volúmenes de metales líquidos: para pequeños volúmenes, la disipación de las corrientes eléctricas es demasiado eficaz como para que pueda compensarla el movimiento del fluido. A día de hoy, solo hay tres experimentos que hayan reproducido el efecto de la dinamo autoexcitada en un fluido conductor en el laboratorio.

UNA DINAMO EN EL LABORATORIO

Los dos primeros se realizaron en 1999, con unos meses de diferencia, en Karlsruhe, Alemania, y en Riga, Letonia. En ambos se impusieron fuertes restricciones al flujo de un metal líquido (sodio, que se funde justo por debajo de los 100 grados Celsius) con la ayuda de tubos. Las geometrías de los flujos se escogieron de modo que se aproximaran a flujos cuyas propiedades de dinamo ya se conocían analíticamente. Los dos experimentos confirmaron que el mecanismo de Larmor era viable. Los campos magnéticos generados crecían hasta que la fuerza de Laplace frenaba el flujo lo suficiente como para poner fin a su amplificación. Sin embargo, los experimentos no mostraron ninguna inversión, porque la geometría de los flujos estaba demasiado limitada.



EL EXPERIMENTO VKS, situado en Cadarache, Francia, reprodujo en 2006 el efecto de dinamo autoexcitada. El sodio líquido contenido en una cavidad cilíndrica se agitaba por medio de dos discos con paletas (*en el centro, en gris*) situados en los extremos del cilindro y que rotaban en sentidos opuestos. Haciéndolos girar a distintas velocidades, los investigadores observaron por primera vez el fenómeno de la inversión del campo magnético.

DINAMO AUTOEXCITADA

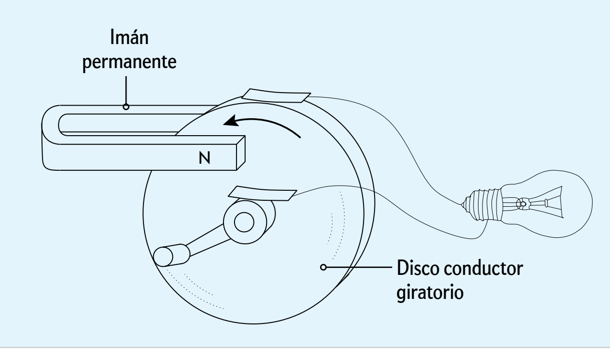
El papel de la inestabilidad

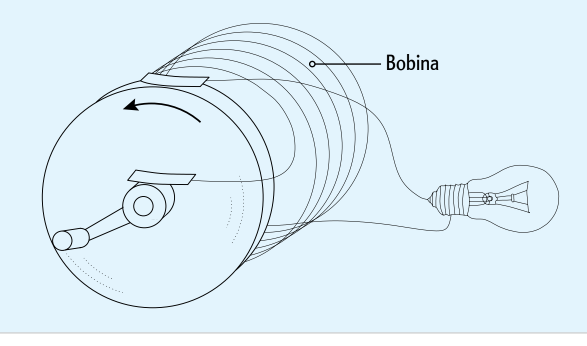
En la dinamo de una bicicleta, el movimiento de la rueda hace que gire un imán permanente situado dentro de una bobina. Según las leyes del electromagnetismo, las variaciones del campo magnético crean una corriente eléctrica en la bobina. En un dispositivo equivalente (*abajo, izquierda*), la corriente se genera gracias a un disco conductor que rota en un campo magnético fijo. Pero ¿cómo podemos producir una corriente eléctrica sin un imán permanente, como parece ocurrir en la Tierra? En 1919, Joseph Larmor propuso una solución: el mecanismo de la dinamo autoexcitada.

Para ilustrar la idea, reemplacemos el imán de nuestro dispositivo por una bobina (*abajo, derecha*). Si en la bobina circula una corriente, aparece un campo magnético que puede desempeñar el papel del imán. El resultado es una dinamo: el giro del disco genera una corriente eléctrica que, a su vez, crea un campo magnético, el cual (si la bobina está enrollada en el sentido adecuado) reforzará el campo inicial. Una amplificación semejante sería la que produce un campo magnético a escala planetaria.

Sin embargo, surge la clásica pregunta del «huevo y la gallina»: ¿qué fue primero, el campo magnético o la corriente eléctrica? En realidad, se trata de una pregunta con trampa. Por encima de una determinada velocidad de rotación del disco conductor, se amplificará cualquier corriente o campo magnético, por pequeños que sean. Esto es lo que se denomina una inestabilidad, y hay diversos fenómenos que pueden aportar el detonante (como el efecto termoeléctrico o una fuente externa de campo magnético).

Encontramos un ejemplo más familiar de inestabilidad en el «efecto Larsen»: por encima de una determinada amplificación, cualquier sonido, por pequeño que sea, es recogido por el micrófono y amplificado por el altavoz, y aumenta hasta volverse estridente. El origen del sonido inicial es irrelevante: a partir de cierta amplificación, el efecto se produce de manera sistemática.





¿Está perdiendo el norte la Tierra?

El campo magnético lleva mucho tiempo sirviéndonos de referencia. Las brújulas que empleamos para orientarnos ¿apuntan invariablemente al norte, o al menos a una zona próxima al polo norte geográfico? De ser así, cabría pensar que el campo magnético es inmutable. Sin embargo, no lo es.

Los registros geológicos muestran que la orientación del campo magnético se ha invertido en numerosas ocasiones a lo largo de la historia de la Tierra. Pero, aun sin llegar a una situación tan extrema, el polo norte magnético no permanece inmóvil: en los últimos veinte años se ha desplazado varios cientos de kilómetros. Se trata de un fenómeno perfectamente normal.

A fin de proporcionar mapas precisos del campo magnético, incluso cerca del polo norte, el modelo magnético mundial (WMM), que normalmente se revisa cada cinco años, se actualizó con un año de antelación en 2019. ¿Debería inquietarnos que el polo norte magnético se desplace actualmente unos 55 kilómetros al año, frente a los menos de 10 kilómetros al año de hace cinco décadas? ¿Constituye tal aceleración un signo de que se está produciendo algún fenómeno excepcional en el núcleo terrestre? ¿Se avecina una inversión de la polaridad del campo magnético? Nada de eso.

La Tierra presenta tres polos norte distintos. El primero, el polo norte geográfico, señala la posición del eje de rotación del planeta. El segundo, el polo norte geomagnético, indica la posición del gran imán dipolar que sirve para caracterizar, en primera aproximación, el campo magnético terrestre (el polo norte geomagnético corresponde en la actualidad al polo sur de dicho imán imaginario). Está cerca del polo norte geográfico —hecho que confiere su utilidad a la brújula— y, por construcción, en las antípodas del polo sur geomagnético. El tercer polo es el polo norte magnético, el lugar donde la aguja de una brújula que pudiera orientarse libremente según sus tres ejes adoptaría una posición perfectamente vertical, como para decirnos: «¡Es aquí!».



PELLIZCANDO ligeramente el mantel, la canica puede rodar bastante lejos. Este fenómeno equivalente explica por qué el polo norte magnético se desplaza tan rápido.

Actualmente el polo norte magnético se desplaza a una velocidad de unos 55 kilómetros al año

El polo magnético tiene en cuenta toda la complejidad del campo, que posee componentes «multipolares» que lo diferencian de un simple dipolo. Por lo tanto, los polos magnéticos norte y sur no tienen por qué estar exactamente uno en las antípodas del otro.

Este último polo, el magnético, es el que despierta mayor interés. Si bien es cierto que sus movimientos son complejos y difíciles de predecir, se restringen a una región bien delimitada, próxima al polo geográfico (*mapas*). En una zona extensa (*azul claro*), el campo magnético es prácticamente vertical. El polo norte magnético (*círculo rojo*) se desplazó deprisa entre 2000 y 2019. Sin embargo, el área de color claro y el polo norte geomagnético (*cuadrado rojo*) apenas se movieron.

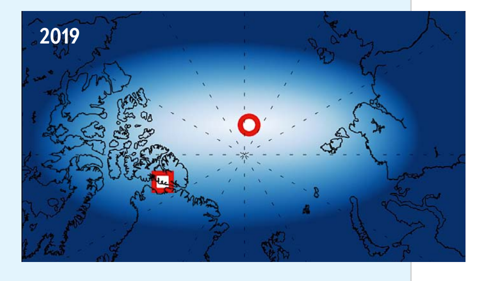
El polo norte magnético experimenta grandes desplazamientos en respuesta a variaciones muy pequeñas del campo magnético. Es algo parecido a lo que pasa con una canica puesta sobre una servilleta: al levantar ligeramente la tela (*imagen*), la canica rueda lejos.

En cambio, la estructura del campo magnético en el polo sur parece presentar más restricciones, las cuales limitan la deriva del polo sur magnético: este se desplaza menos de 10 kilómetros al año, sin signo alguno de aceleración. Así que no hay motivos para preocuparse por una inversión inminente.

Eso no quiere decir que los rápidos movimientos del polo norte magnético carezcan de interés. Nos informan sobre la dinámica del campo magnético y los movimientos del hierro líquido en el seno del núcleo terrestre.







En 2006, el tercer experimento, denominado VKS y realizado en Cadarache, Francia, permitió obtener una dinamo autoexcitada en un flujo turbulento con pocas restricciones. Dos discos situados en los extremos de una cavidad cilíndrica agitaban el sodio líquido al girar en sentidos opuestos. El experimento permitió observar por primera vez en un laboratorio inversiones de polaridad espontáneas y comprender mejor cómo se producen a escala planetaria.

Las ecuaciones de Elsasser demuestran que este cambio de polaridad es posible: si un flujo puede mantener un campo magnético con una determinada polaridad, también puede, sin necesidad de modificarlo, mantener el campo de polaridad opuesta. Por el contrario, la cuestión de la transición entre las polaridades ha supuesto un misterio durante mucho tiempo. El experimento VKS puso de manifiesto el papel de la simetría: el campo magnético generado por los dos discos que rotan en sentidos opuestos solo se invierte si se rompe la simetría del flujo, es decir, si los discos no giran a la misma velocidad.

En 2009, junto a François Pétrélis, de la Escuela Normal Superior de París, y otros dos colaboradores, modelicé la dinámica de la inversión en un sistema de dimensión baja (con pocos grados de libertad). Logramos reproducir los aspectos esenciales de la inversión del campo magnético terrestre: una lenta disminución de la intensidad del campo (que no llega a desaparecer del todo, sino que se vuelve caótico), seguida de una inversión rápida de polaridad y, finalmente, un rápido restablecimiento de la intensidad. Los recientes trabajos de Brad Singer sobre los registros geológicos, mencionados anteriormente, han confirmado este proceso en la última inversión del campo geomagnético.

DESAFÍOS TÉCNICOS

En el experimento VKS, los discos giratorios que generaban el flujo eran de hierro, un material que puede imanarse, lo que podría contribuir a la generación de un campo magnético y afectar a los resultados. Varios equipos de investigación tratan de realizar experimentos con geometrías más similares a la de la Tierra y sin emplear hierro.

Por ejemplo, Daniel Lathrop, de la Universidad de Maryland, llevó a cabo un proyecto basado en un recinto esférico de tres metros de diámetro en rotación. Sin embargo, debido a las dificultades técnicas, no obtuvo resultados. Cary Forest, de la Universidad de Wisconsin-Madison, prepara un experimento que utilizará plasma en vez de un metal líquido. Por último, en Dresde, la plataforma DRESDYN (acrónimo en inglés de Instalación de Sodio para Estudios Termohidráulicos y de Dinamo de Dresde) permitirá estudiar distintas configuraciones, entre ellas una dinamo de 2 metros de diámetro impulsada por movimientos de precesión.

En los próximos años, estos experimentos deberían ayudarnos a comprender mejor el fenómeno de la dinamo autoexcitada. Pero el reto no se limita al geomagnetismo. En su artículo de 1919, Larmor se centró sobre todo en el campo magnético del Sol. La estrella, cuyo diámetro es cien veces mayor que el de la Tierra, genera un campo magnético organizado de una intensidad comparable a la del campo terrestre (unos 10 gauss para la estrella y 0,5 para la Tierra), salvo en las regiones de las manchas solares, donde puede alcanzar varios miles de gauss. Otra diferencia es que la polaridad del campo magnético solar se invierte de forma casi periódica, cada once años. De hecho, gran parte de los objetos astrofísicos producen un campo magnético. Es el caso de la mayoría de los planetas del sistema solar, aunque no todos: Venus, por ejemplo, carece de campo magnético [*véase* «Campos magnéticos en el cosmos», por Eugene N. Parker; Investigación y Ciencia, octubre de 1983].



EL CAMPO MAGNÉTICO de una galaxia polariza la luz de esta o de otras fuentes más lejanas. Analizando esa luz es posible cartografiar el campo magnético, como se muestra aquí para la galaxia M51.

DINAMOS GALÁCTICAS

Las galaxias también generan un campo magnético del orden de un microgauss (un millón de veces menos intenso que el de la Tierra). De nuevo, el efecto dinamo es la única explicación para el origen de ese campo organizado a gran escala. Su fuente son los movimientos del medio interestelar vinculados a la rotación de la galaxia y a las ondas de choque provocadas por las explosiones de supernova. El estudio de los diferentes campos magnéticos no es sencillo, dado que interaccionan entre sí. Por ejemplo, el viento solar interacciona con la magnetosfera terrestre, originando las espectaculares auroras boreales. A lo largo de cien años, los investigadores han comprendido muchos aspectos de la dinamo terrestre, pero aún quedan preguntas por responder sobre la Tierra y otras partes del universo. IyC

PARA SABER MÁS

The origin of the Earth's magnetic field: fundamental or environmental research? Emmanuel Dormy en *Europhysics news*, vol. 37, n.º 2, págs. 22-25, marzo de 2006.

Strong-field spherical dynamos. Emmanuel Dormy en *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 789, págs. 500-513, febrero de 2016.

Turbulent geodynamo simulations: a leap towards Earth's core. Nathanaël Schaeffer et al. en *Geophysical Journal International*, vol. 211, n.º 1, págs. 1-29, octubre de 2017.

Self-exciting fluid dynamos. Keith Moffatt y Emmanuel Dormy. Cambridge University Press, 2019.

Turbulent convective length scale in planetary cores. Céline Guervilly et al. en *Nature*, vol. 570, págs. 368-371, junio de 2019.

EN NUESTRO ARCHIVO

La geodinamo en el laboratorio. Ulrich Müller y Robert Stieglitz en *IyC*, mayo de 2002.

La geodinamo. Gary A. Glatzmaier y Peter Olson en *IyC*, junio de 2005.

El motor de la dínamo terrestre. Dominique Jault, Daniel Brito, Philippe Cardin y Henry-Claude Nataf en *IyC*, abril de 2006.



MEDICINA

¿Vuelve la fagoterapia para quedarse?

Un tratamiento que data de la Primera Guerra Mundial comienza a resurgir en la lucha contra las mortíferas infecciones multirresistentes

Charles Schmidt

Ilustración de Ashley Mackenzie

EN SÍNTESIS

Las bacterias nocivas se están volviendo cada vez más resistentes a los antibióticos. Los médicos depositan sus esperanzas en una nueva estrategia basada en virus que las infectan: los bacteriófagos o fagos.

En este momento diversos ensayos clínicos analizan fagoterapias que destruyen las bacterias con estrategias muy distintas.

Para que estos tratamientos lleguen a los hospitales, será preciso acortar notablemente el tiempo y el coste y hallar el fago adecuado para cada bacteria.

Charles Schmidt es periodista especializado en salud y medioambiente.



BOBBY BURGHOLZER PADECE FIBROSIS QUÍSTICA, UNA ENFERMEDAD genética que predispone a sufrir infecciones pulmonares toda la vida. No hace mucho aún mantenía los síntomas a raya gracias a los antibióticos, hasta que dejaron de surtir efecto. A sus 40 años fue un varapalo. Siempre había procurado mantenerse en forma y jugaba al hockey, pero cada día le costaba más subir cuestas o escaleras. Consciente de su empeoramiento, le preocupaba que no hubiese cura. Con una esposa y una pequeña por las que luchar, este visitador médico emprendió la búsqueda de otros tratamientos. Uno atrajo su atención por encima de todos: un virus bacteriófago.

Los bacteriófagos, o fagos para abreviar, son ubicuos en la naturaleza. Invaden las bacterias y se apropian de su maquinaria replicativa para multiplicarse por cientos en su seno, hasta que la célula invadida revienta y los libera al exterior. Descubiertos por los microbiólogos en torno a 1910, se reproducen solo en las células bacterianas. La primera aplicación médica de estos virus se remonta a los años posteriores a la Primera Guerra Mundial, contra infecciones como la fiebre tifoidea, la disentería o el cólera. Más tarde, durante la Guerra de Invierno que la Unión Soviética y Finlandia libraron a caballo de 1939 y 1940, su aplicación a los soldados heridos redujo a un tercio las muertes por gangrena.

Hoy aún es posible adquirir tales tratamientos en países de la antigua Europa comunista, pero en los países occidentales hace décadas que se abandonaron. Dos médicos de la Universidad Yale, Monroe Eaton y Stanhope Bayne-Jones, publicaron en 1934 una revisión influyente en la que argüían con displicencia que los datos clínicos sobre la supuesta acción antinfecciosa de los fagos eran contradictorios y poco convincentes. Acusaron de engaño a las empresas farmacéuticas que fabricaban los fagos medicinales. La puntilla final llegaría en la década siguiente, con la rápida difusión de los antibióticos, tan eficaces como baratos.

Por ahora no se ha autorizado la comercialización de ninguna fagoterapia para humanos en ningún país occidental y la inversión en investigación permanece en mínimos. Aunque en los estudios con humanos en Europa oriental se han cosechado algunos resultados alentadores, como los del Instituto Eliava de Tiflis, en Georgia, que es el epicentro de la investigación en este campo, muchos expertos occidentales afirman que no cumplen con las rigurosas normas de Occidente. Además, los escasos ensayos clínicos realizados en Europa oriental y en Estados Unidos han culminado con algunos fracasos estrepitosos.

A pesar de ese escepticismo histórico, parece que la fagoterapia vuelve a la palestra. La asistencia a las conferencias científicas que la abordan va en auge. Y los responsables de la Agencia Federal de Fármacos y Alimentos de EE.UU. (FDA) y de las agencias sanitarias de otros países no ocultan su interés por ella. Más de una docena de empresas occidentales la investigan y este año ha dado inicio una serie de ensayos clínicos en Estados Unidos. ¿A qué se debe tanto entusiasmo? Algunos afectados por infecciones multirresistentes que ya no respondían a los antibióticos se han curado gracias a la fagoterapia. En virtud del llamado «uso compasivo», la FDA ha accedido a que los médicos que lo soliciten administren tales tratamientos experimentales si demuestran que el paciente ha agotado todas las demás opciones, justo la situación que Burgholzer esperaba probar en su caso.

Las infecciones multirresistentes se están convirtiendo en una grave amenaza para la salud pública. Cada año mueren al menos 700.000 personas en el mundo a consecuencia de estas enfermedades incurables, y las Naciones Unidas predicen que podrían llegar a ser diez millones en 2050. A todo esto, la industria farmacéutica está agotando la línea de desarrollo de nuevos antibióticos.

Como cualquier otro virus, los fagos no están realmente vivos, pues no crecen ni se mueven, ni fabrican energía; se dejan llevar sin más hasta que, por azar, quedan adheridos a una bacteria. A diferencia de los antibióticos, que destruyen las cepas dañinas y las provechosas por igual, cada tipo de fago ataca a una sola especie y, quizás, algunas otras muy afines a ella, sin afectar al resto del microbioma. La mayoría posee una cabeza icosaédrica (un poliedro con 20 caras triangulares) que alberga el genoma y que está conectada a un largo cuello rematado en una cola de fibras, con las que se fijan a los receptores situados en la pared celular de la bacteria. El virus fijado perfora con una especie de jeringuilla la pared e inyecta su material genético, que pone a la célula bacteriana a fabricar copias del intruso. Otros fagos sin utilidad médica penetran del mismo modo, pero permanecen latentes y no se reproducen hasta que la célula entra en división.

Los fagos han evolucionado en paralelo con sus hospedadoras durante miles de millones de años y es tal su abundancia que serían capaces de acabar con el 40 por ciento de las bacterias de los mares cada día, lo que influiría en la producción marina

de oxígeno y, quizás, hasta en el clima terrestre. A medida que los avances científicos permiten emparejar con mayor exactitud cada bacteriófago con su diana, resulta cada vez más obvio que podrían ser herramientas médicas de suma utilidad. Los pocos centros capaces de fabricar los fagos terapéuticos conforme a las estrictas normas oficiales están desbordados por la demanda.

Los ensayos clínicos en marcha comienzan a generar los datos de calidad necesarios para convencer a los organismos reguladores de que la fagoterapia es viable, aunque queden muchas incógnitas por despejar. La más importante es si servirá contra las infecciones a gran escala. Los médicos deben seleccionar aquellos fagos que actúen contra los patógenos del paciente, pero no sabemos si podrán hacerlo con la economía, la velocidad y la eficacia precisas para que se conviertan en un tratamiento habitual. También resulta problemática la escasez de normas destinadas a regular la producción, la evaluación y el uso de la fagoterapia. Según Jeremy J. Barr, microbiólogo de la Universidad Monash en Melbourne: «Si es cierto que puede salvar vidas, nosotros, como parte de la sociedad, tendremos que averiguar si funcionará y el mejor modo de aplicarla. La crisis de la resistencia a los antibióticos es demasiado grave como para prescindir de ella».

UN DILEMA, UNA VULNERABILIDAD

Burgholzer supo de los fagos por sus conversaciones con otros enfermos de fibrosis quística del país. Mientras peinaba Internet en busca de más información, se topó con un vídeo de Youtube filmado por investigadores de la Universidad Yale que trabajan con ellos. No tardó en ponerse en contacto con Benjamin Chan, biólogo del departamento de Ecología y Biología Evolutiva de dicha universidad. Desde su incorporación en 2013, este investigador ha reunido una colección de fagos que ha ido recogiendo de las aguas residuales, del suelo y de otras fuentes naturales, colección que ha puesto a disposición de los médicos del Hospital Yale en New Haven, así como de otros centros.

El primer caso de Chan, en 2016, fue un éxito rotundo. Aisló un fago del agua de un estanque con el que los médicos lograron curar a Ali Khodadoust, un destacado cirujano ocular. Este sufría una terrible infección multirresistente en el tórax como complicación de una operación a corazón abierto cuatro años antes. Tomaba a diario dosis enormes de antibióticos para frenar a la invasora, la tenaz *Pseudomonas aeruginosa*. El virus que Chan seleccionó se fijaba a una bomba de expulsión ubicada en la pared externa de la bacteria, que expulsa los antibióticos y suele abundar en las cepas resistentes. En la mayoría de las células de *P. aeruginosa* del cuerpo de Khodadoust se detectaron estas bombas, por lo que serían presa del fago. Las pocas que carecían de ellas se enfrentaban a un dilema evolutivo: esa carencia significaba que sobrevivirían al virus, pero que sucumbirían a los antibióticos. Con la combinación de fagos y antibióticos, Khodadoust se fue recuperando poco a poco en el plazo de semanas. Murió dos años después, a causa de otra enfermedad no infecciosa, a los 82 años.

Después de este primer caso, Chan suministró fagos para otra docena de tratamientos experimentales en Yale, la mayoría destinados a pacientes con fibrosis quística e infecciones pulmonares causadas por *P. aeruginosa*. A Burgholzer le pidió que le remitiese por mensajero una muestra de esputo, para averiguar qué fagos podrían serle de ayuda.

Visité a Chan el pasado diciembre en Yale, cuando el escrutinio ya había comenzado. Vestía una camiseta a cuadros de Oxford, pantalones militares y mocasines, y no tardó en llamarme «tío», su apelativo preferido. Tras una breve charla en su despacho, nos dirigimos a un laboratorio contiguo, donde me mostró una placa de Petri. Las bacterias de Burgholzer habían crecido hasta formar un césped gris que la cubría por entero, a excepción de dos delgadas líneas transparentes. Me contó que las crecidas ahí habían muerto gracias a unas gotas de la solución de fagos con la que pronto trataría a Burgholzer. Como su infección estaba provocada por tres bacterias del género *Achromobacter,* el plan consistía en seleccionar otros tantos virus que las eliminasen una a una, estrategia llamada monofagoterapia secuencial. En sus propias palabras: «En el fondo, estamos jugando una partida de ajedrez contra los microbios. Hemos de meditar todos los movimientos».

Chan esperaba provocar un dilema evolutivo similar al que supuestamente curó a Khodadoust. Como le fue imposible dar con un fago que se adhiriese a las bombas de expulsión de *Achromobacter*, centró su atención en los que reconocen una gran proteína de la pared bacteriana, denominada lipopolisacárido (LPS). Esta posee cadenas laterales de longitud diversa, conocidas como antígenos O. Cuanto más largas son, más resistente es la bacteria, no solo a los antibióticos, sino también al sistema inmunitario del hospedador. Chan escogió a los fagos con miras a acabar con las cepas de cadenas largas, no con las de cadena corta, más débiles. Si todo salía según lo planeado, la sucesión de fagos acabaría haciendo que en la población bacteriana predominasen las cepas de cadena corta, más vulnerables a los fármacos y al sistema inmunitario del enfermo. Según él, «las bacterias compiten entre sí por colonizar el cuerpo. Cuando los fagos exterminan de repente multitud de individuos de una especie, lo normal es que otros acaben ocupando su lugar». El objetivo es que los nuevos ocupantes sean menos virulentos que los predecesores.

Paul Turner, catedrático y jefe de Chan en el mismo departamento, ha dedicado su carrera al estudio de los dilemas evolutivos en el mundo microbiano. El mismo día de mi visita, me explicó que las fagoterapias a veces funcionan sin que la bacteria infecciosa desaparezca completamente del cuerpo. Sobre todo cuando la infección es crónica, los facultativos recurren a los fagos para moldear selectivamente la población de bacterias nocivas y sacar a relucir sus puntos débiles. «Si se vuelven vulnerables a los antibióticos, tanto mejor», me dijo. La combinación de antibióticos y de fagos en busca del efecto óptimo «facilita que se avance con rapidez con la fagoterapia».

Conduje con Chan hasta el Hospital Yale en New Haven para interesarme por el progreso de la fagoterapia de Burgholzer. Subimos en ascensor hasta la segunda planta, donde esperamos a su colaborador clínico, Jonathan Koff, neumólogo y director del programa de fibrosis quística en adultos. Llegó pronto con su macuto al hombro, dando botes. Burgholzer nos encontró a los tres en una sala de tratamiento y habló con voz ronca, el único signo externo de su enfermedad. Mientras Koff y Chan comparaban sus notas, me comentó que deseaba ponerse bien por su hija de tres años. Cuando llegó el momento de recibir el tratamiento, le pasó el teléfono móvil a su esposa y le dijo con una leve sonrisa: «Ten, toma una foto para mi madre». Entonces se cubrió la boca y la nariz con el nebulizador y comenzó a inhalar una solución vaporizada de fagos.

CÓCTELES DE FAGOS

Según Koff, la monofagoterapia secuencial tiene sentido como tratamiento contra la fibrosis quística y otras enfermedades

Continúa en la página 80

La enconada batalla contra las bacterias

Multitud de bacterias infecciosas que hasta ahora erradicábamos con los antibióticos han adquirido defensas eficaces contra ellos. Los fagos (virus que infectan a las bacterias) constituyen un arma de otra naturaleza. Los médicos están investigando tres tipos de fagoterapia que podrían vencer las resistencias debidas a la continua escalada de ataques y contramedidas, al tiempo que se intenta determinar si las bacterias acabarán encontrando el modo de burlarlos.

Bacteria nociva (*amarillo*)

Bacteria resistente (*naranja*)

Bacteria provechosa (*azul*)

1 LOS ANTIBIÓTICOS NO DISTINGUEN ENTRE LAS BACTERIAS BUENAS Y MALAS

Los antibióticos penetran en ellas y ponen freno a su propagación de varios modos, como destruyendo la pared celular o impidiendo su reproducción. A menudo afectan también a las bacterias provechosas, pero son económicos y fáciles de usar.

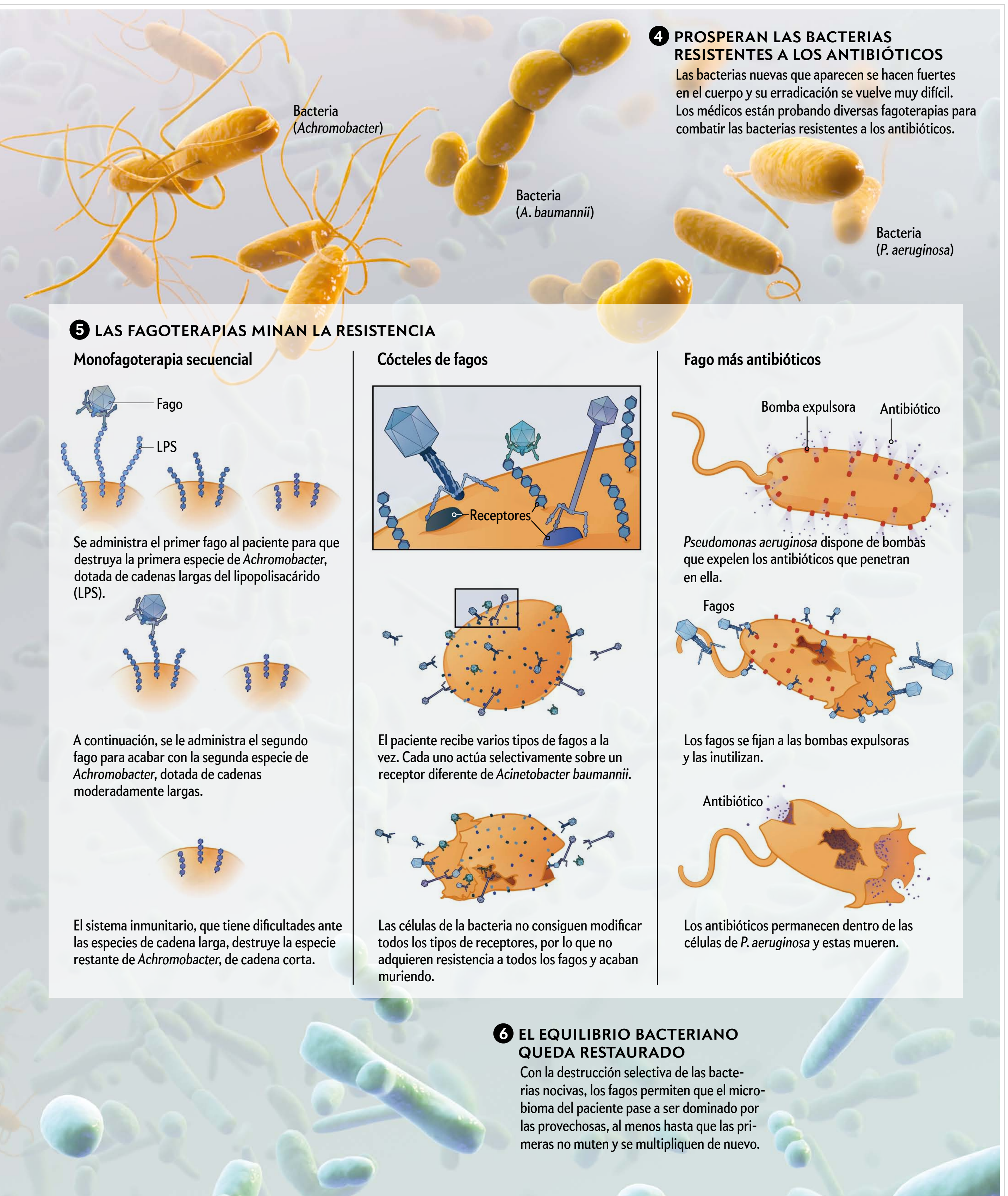
2 LOS FAGOS ACABAN SOLO CON LAS MALAS

Los fagos actúan selectivamente contra una bacteria perjudicial en concreto y dejan intactas las provechosas. Pero hasta la fecha, resulta difícil y costoso encontrar en la naturaleza el fago correcto, o modificar genéticamente uno para que ataque al microbio específico causante de la enfermedad de una persona.

Suelen destruir la bacteria fijándose a su exterior para inyectar su material genético a través de la pared celular. El ADN vírico se apodera de la maquinaria replicativa bacteriana, que comienza a fabricar los componentes del intruso, que ensamblados darán lugar a multitud de nuevos fagos. Para salir, la harán explotar, provocando su muerte.

3 PERO LAS BACTERIAS SE VUELVEN RESISTENTES

Algunas bacterias dañinas mutan para crear nuevos rasgos celulares con los que resistir los ataques. A medida que proliferan las resistentes, van dañando al individuo infectado sin que los antibióticos ni los fagos administrados hasta entonces consigan neutralizarlas.



AXS BIOMEDICAL ANIMATION STUDIO

Viene de la página 77
crónicas en que las bacterias infecciosas se atrincheran en el organismo. Opina que cuando no hay manera de erradicar del todo a los patógenos, la táctica consiste en minar las cepas perjudiciales.

Algunos médicos optan por una estrategia distinta: el enfermo recibe muchos fagos en un cóctel con el cual se pretende dejar fuera de combate la infección, pues se actúa al mismo tiempo contra varios mecanismos de resistencia bacteriana. En la situación ideal, cada virus del cóctel se apoderará de un receptor diferente, de tal modo que, si las bacterias desarrollan resistencia contra uno, los demás seguirán actuando.

Chan y Koff aducen que las interacciones entre los fagos y las bacterias son impredecibles y existe el riesgo de que los patógenos expuestos al cóctel se vuelvan resistentes enseguida a todos los virus que lo componen, lo cual limitaría las opciones de tratamiento en el futuro. «Dividir el cóctel en tratamientos secuenciales nos permite tratar a los pacientes durante más tiempo», asegura Koff.

Jessica Sacher, cofundadora del Directorio de Fagos, una plataforma independiente que pretende mejorar el acceso a los fagos y a lo que sabemos sobre ellos, señala que ambos métodos tienen argumentos en contra: «La ciencia todavía no es capaz de afirmar si uno es mejor que el otro». Señala que los cócteles tal vez serían más convenientes para los casos graves, que no siempre pueden esperar a que se diseñe una estrategia secuencial.

La importancia de la rapidez se puso en evidencia en el ahora famoso caso de Tom Patterson, catedrático en la Universidad de California en San Diego, que gracias a uno de esos cócteles sobrevivió en 2016 a una infección multirresistente contraída durante un viaje a Egipto. En su caso el culpable era *Acinetobacter baumannii*, un patógeno notable por su resistencia, muy difundido en Asia y que avanza sin tregua hacia Occidente. Patterson sufría una insuficiencia multiorgánica cuando le administraron mezclas de cuatro virus a través de un catéter inserto en el abdomen y un quinto por vía intravenosa. Lo trataron dos veces al día durante cuatro semanas; en menos de tres meses la infección acabó remitiendo. Hoy goza de buena salud, aunque sigue necesitando mucha rehabilitación.

El caso tuvo una gran resonancia en todo el mundo. Los médicos que lo trataron eran Robert Schooley, amigo y jefe de Enfermedades Infecciosas en su misma universidad, y su propia esposa, Stefanie Strathdee, entonces directora del Instituto de Salud Global de la misma institución. A los dos años, con una inversión inicial de 1,2 millones de dólares, ambos fundaron en esa universidad el Centro para Aplicaciones y Tratamientos Innovadores con Fagos, destinado a financiar la investigación clínica e impulsar estudios en ese campo.

Los fagos con que se le trató habían sido elegidos por su capacidad para acabar con las muestras infecciosas de *A. baumannii* obtenidas de su cuerpo, gracias a los ensayos realizados en el Centro Naval de Investigación Médica en Fort Detrick, Maryland, así como en la Universidad A&M de Texas. Con tales ensayos es posible analizar simultáneamente la actividad bactericida de cientos de ellos en solo 8 a 12 horas, según Biswajit Biswas, jefe del departamento de bacteriófagos de dicho centro, que suministró algunos de los que se le administraron a Patterson. Diseñador del ensayo y creador del banco de fagos, me comentó que la prueba permite sustituir con facilidad los virus cuando surgen resistencias contra ellos. La bacteria en cuestión se volvió resistente al primer cóctel vírico al cabo de dos semanas, pero en poco tiempo la Armada preparó otro de efectos más duraderos. A la empresa Adaptive Phage Therapeutics, con sede en Gaithersburg, Maryland, se le ha autorizado a realizar el ensayo del Centro Naval y a usar su banco; además, prevé iniciar en breve ensayos clínicos con afectados por infecciones urinarias.

Con el ensayo del Centro Naval solo se averigua si las células bacterianas sucumbirán, no qué receptores bacterianos son sensibles. Sigue sin haber consenso sobre si los cócteles deberían reconocer selectivamente ciertos receptores. Ry Young, genetista especializado en fagos de la Universidad A&M de Texas, que también suministró virus para Patterson, defiende que sí: «Ni siquiera sabemos si fueron los responsables de la cura. Suponemos que la fagoterapia redujo la carga infecciosa hasta un nivel en que el sistema inmunitario pudo retomar el control». A su juicio, el mejor cóctel sería una combinación de tres o cuatro virus dirigidos contra distintos receptores de la cepa bacteriana. La posibilidad de que una bacteria se vuelva resistente a un fago es de aproximadamente una entre un millón, mientras que la probabilidad de adquirirla o de generar formas mutantes de todos los receptores sensibles a los fagos del cóctel es casi infinitesimal, muy cercana a cero. Además, saber qué receptores son los importantes es esencial si los médicos pretenden devolver a las bacterias su sensibilidad a los antibióticos.

Barr asegura que se están esforzando por averiguar qué receptores son los sensibles a los cócteles que recibió Patterson, pero discrepa de que sea necesario conocerlos de antemano. En su opinión, se trata de «un punto de vista comprensible y un tema candente en el campo. Sabemos muy poco acerca de ellos, hemos de hacer comprobaciones y sopesar diversos aspectos antes de administrarlos como tratamiento. ¿Significa que hemos de identificar los receptores del hospedador? Puesto que hoy en día eso implicaría una labor ingente, diría que no es imprescindible, pero sin duda sí deseable».

FAGOS GENOMODIFICADOS

A la vista del comportamiento caprichoso de los cócteles, algunos opinan que hay que modificar los fagos con ingeniería genética para que se fijen a ciertos receptores y también destruyan las bacterias con nuevas estrategias. La inmensa mayoría de los usados hasta ahora son naturales, recogidos de su hábitat, pero la modificación genética marca una nueva frontera gracias a la experiencia positiva que esta cuenta en su haber. Isabelle Carnell, una adolescente británica con fibrosis quística, presentaba un cuadro infeccioso de suma gravedad que afectaba al hígado, a las extremidades y al tronco a raíz de un doble trasplante de pulmón recibido en 2017. Su azote, *Mycobacterium abscessus*, no respondía a ningún antibiótico. Ese mismo año, por primera vez en la disciplina, los investigadores de varias instituciones trataron a la joven con un cóctel de tres fagos genomodificados. Uno despedaza a *M. abscessus* a medida que se replica en su interior. Los otros dos también la destruyen, pero no con tanta eficacia, pues sobreviven de un 10 a un 20 por ciento de las bacterias. Por eso, el equipo encabezado por el catedrático de la Universidad de Pittsburgh Graham Hatfull eliminó un gen de ambos fagos y los convirtió así en bactericidas de diseño. El cóctel triple acabó con la infección en menos de seis meses.

El primer fago genomodificado se creó en la Universidad de Boston en 2007. Se consiguió que produjera una enzima que degrada con más eficacia las biopelículas pegajosas que ciertas bacterias infecciosas secretan como defensa. Desde entonces se han modificado otros para que acaben con un mayor espectro de bacterias nocivas o introduzcan fármacos y vacunas en determi-

nadas células. Estos virus diseñados en el laboratorio son más fáciles de patentar que los naturales, por lo que resultan muy interesantes para las empresas farmacéuticas. Como si hubiese querido resaltar este aspecto, una división del gigante farmacéutico Johnson & Johnson ha cerrado en enero un acuerdo con Locus Biosciences, por valor de 818 millones de dólares, que pretende elaborar fagos genomodificados con la herramienta de edición génica CRISPR.

La comercialización de la fagoterapia no será nada fácil. Barr y otros especialistas señalan que genomodificar un fago exigirá una enorme inversión de tiempo, trabajo y dinero, y que, pese a todo, tarde o temprano las bacterias acabarán adquiriendo resistencia contra él. Además, según Barr, la concesión de la autorización oficial para un fago así «podría ser muy difícil», un punto de vista que otros entrevistados para el artículo comparten. Ahora bien, la portavoz de la FDA, Megan McSeveney, defendía por correo electrónico que la agencia no diferencia entre los fagos naturales y los artificiales, siempre que las preparaciones terapéuticas sean seguras a todos los efectos.

PERSPECTIVAS DE FUTURO

Las empresas interesadas se han lanzado a valorar las diversas estrategias con que ampliar el mercado de los fagos. Algunas apuestan por administrar tratamientos personalizados para cada infección, como es el caso de Adaptative Phage Therapeutics. Su director ejecutivo, Greg Merril, propone ofrecer a los laboratorios de diagnóstico y a los principales centros médicos del mundo los ensayos del Centro Naval usados para el escrutinio de los fagos con las muestras infecciosas. Aquellos que sean eficaces contra las bacterias predominantes en cada región se suministrarían a través de los canales comerciales, conservados en viales listos para usar, aprobados por la FDA. Opina que los médicos deberían estar atentos a la aparición de resistencias en los enfermos tratados y reemplazar los fagos obsoletos por otros nuevos hasta que las infecciones quedasen de nuevo bajo control. El coste por paciente en el sistema actual de uso compasivo se cifra en unos 50.000 dólares, cuantía que descenderá con la economía de escala.

Otras empresas descartan este enfoque personalizado en favor de productos cuya composición ya venga dada de antemano, a semejanza de los antibióticos comerciales. El producto estrella de Armata Pharmaceuticals es un cóctel de tres fagos naturales que actúan selectivamente contra *Staphylococcus aureus*, la causante de numerosas infecciones estafilocócicas hospitalarias. Este es el caso de los ensayos clínicos con pacientes que sufren una infección en las bombas cardíacas mecánicas. El plan de Armata consiste en vigilar los estafilococos resistentes en la población general para introducir nuevos cócteles a medida que se necesiten, del mismo modo que las vacunas antigripales se modifican cada año para que actúen contra las últimas cepas del virus en circulación. Los ejecutivos de las farmacéuticas dijeron que era demasiado pronto para estimar los costes de este enfoque.

Los expertos siguen sin saber qué método acabará imponiéndose, si es que alguno lo hace: monoterapia secuencial, cócteles, fagos genomodificados y tratamientos estandarizados o personalizados. Barr ve muy posible que ni siquiera exista una estrategia óptima. «La elegida dependería en cada caso de cuestiones intrincadas, como el patógeno, la enfermedad o los antecedentes médicos del paciente», opina.

La fagoterapia no escapa a los sesgos geopolíticos, manifiesta Strathdee. Lo que necesitamos ahora son resultados positivos en ensayos clínicos bien controlados que ayuden a vencer el escepticismo. Alan Davidson, bioquímico de la Universidad de Toronto, supone que en menos de una década el tratamiento se abaratará y ganará en rapidez y facilidad de uso. Se inclina por la genomodificación, pues cree que la secuenciación del genoma de las bacterias de cada paciente y la posterior síntesis del fago que cure su infección acabarán siendo más ágiles y económicos «que escrutar los patógenos con una batería de virus sacados de la naturaleza».

De vuelta a nuestro relato, hasta marzo de 2019 Burgholzer se había ido administrando la fagoterapia en su casa con un nebulizador, sin percibir la mejoría deseada. Chan y Koff introdujeron ese mes un segundo fago que actuaba selectivamente contra otra cepa de *Achromobacter*. En abril, la cantidad de bacterias alojada en sus pulmones había caído más de dos órdenes de magnitud desde que iniciara el tratamiento. «Parece que hemos ido destruyendo las cepas una tras otra, con éxito», me dijo Koff. Aun así, reconoció que el estado de los pulmones no había mejorado mucho. Al preguntarle el motivo, me respondió que «sabemos mucho más sobre el fago que usamos contra *P. aeruginosa* que de los que actúan contra *Achromobacter*». La capacidad para manipular la infección «parte de menos información».

Según este médico, el paso siguiente consistirá en secuenciar genéticamente las muestras de moco de los pulmones de Burgholzer. «Hemos de saber realmente lo que está pasando con esas bacterias para alcanzar el alto nivel de sofisticación que tenemos con *P. aeruginosa*. Bobby nos ofrece la posibilidad de ver si, como mínimo, podemos ayudarlo.» Animado pese a la frustración, el médico matiza que «algunos pacientes responden mejor que otros. Hemos de conocer la dinámica». IyC

PARA SABER MÁS

Global priority list of antibiotic-resistant bacteria to guide research, discovery, and development of new antibiotics. Organización Mundial de la Salud, 2017.

Engineered bacteriophages for treatment of a patient with a disseminated drug-resistant *Mycobacterium abscessus*. Rebekah M. Dedrick et al. en *Nature Medicine*, vol. 25, págs. 730–733, mayo de 2019.

Directorio de Fagos: **https://phage.directory**

EN NUESTRO ARCHIVO

La resistencia contra los antibióticos. Stuart B. Levy en *IyC*, mayo de 1998.

Un siglo de bacteriófagos. Forest Rohwer y Anca M. Segall en *IyC*, abril de 2016.

La crisis de los antibióticos. Joan Gavaldá en *IyC*, noviembre de 2016.

Los bacteriófagos, unos eficaces antimicrobianos. Lucía Fernández Llamas, Diana Gutiérrez y Pilar García en *IyC*, marzo de 2017.

por H. Joachim Schlichting



H. Joachim Schlichting es exdirector del Instituto de Didáctica de la Física de la Universidad de Münster.

Vórtices en la taza de té

¿Por qué al remover el té los pequeños restos de hojas se acumulan en el centro de la taza? Hace un siglo, la dinámica de este fenómeno cotidiano llegó a interesar al mismo Albert Einstein

Quienes beban té de manera habitual probablemente se hayan percatado de que, tras removerlo, los pequeños restos de hojas que hayan caído en la taza acaban siempre depositados en el centro, como si los hubiéramos apilado allí con sumo cuidado. Al principio algunas hojas intentarán ascender por la parte central, pero todas terminarán por posarse en el fondo. El propio Albert Einstein vio en este proceso algo más que una simple curiosidad con la que entretenerse durante un descanso. En 1926, el físico lo empleó como un modelo simplificado de la dinámica que conduce a la formación de meandros en los ríos, un fenómeno que por aquella época no se entendía bien.

A primera vista, el comportamiento de las hojas de té parece contradecir lo que observamos en otros objetos que giran, los cuales suelen verse expelidos hacia fuera. Así ocurre por ejemplo con los pasajeros de un vehículo que describe una curva, quienes se ven empujados hacia el exterior. Y el mismo fenómeno se manifiesta de manera espectacular cuando un líquido que se balancea en un plano vertical permanece sin ningún problema en su recipiente [*véase* «La catástrofe del café para llevar», por H. Joachim Schlichting; Investigación y Ciencia, enero de 2015].

Para entender físicamente los fenómenos que acabamos de mencionar podríamos recurrir a la fuerza centrífuga,

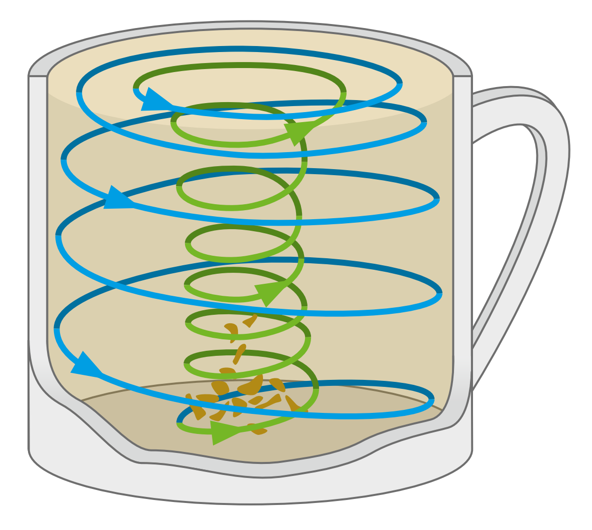






¿POR QUÉ NO SE ESPARCEN? Contrariamente a lo que cabría pensar, al remover una taza de té, los pequeños restos de hojas que giran (*izquierda*) acabarán acumulándose en el centro del recipiente cuando el líquido alcance el estado de reposo (*derecha*).

considerada por muchos como «un ente, una especie de fantasma preparado para cumplir con su deber e intervenir donde quiera que algo gire», como expresó en cierta ocasión el físico y pedagogo alemán Martin Wagenschein. Sin embargo, esta fuerza aparente solo está definida en el sistema de referencia acelerado que se desplaza con el objeto. Si observamos el movimiento de rotación desde fuera, la fuerza centrífuga se desvanece: visto desde la cuneta de la carretera, el pasajero del automóvil que toma la curva tiende, por inercia, a mantener su estado de movimiento original; es decir, a seguir avanzando en línea recta y a velocidad constante. Lo único que se lo impide es el cinturón de seguridad del vehículo, el cual se desvía de la trayectoria rectilínea inicial debido a una fuerza dirigida hacia el centro de la curva, no hacia el exterior.



CORRIENTES OPUESTAS: Debido al rozamiento con la superficie del recipiente y al que tiene lugar en el propio seno del líquido, cuando removemos el té con una cucharilla se forman corrientes de varios tipos. Una porción del líquido que comience en el fondo subirá primero en espiral en la parte central de la taza (*verde*); después descenderá por la zona más externa (*azul*). Cuando se aproxime al fondo, se desplazará hacia el interior y desde allí se elevará otra vez. Este movimiento arrastra los pequeños restos de las hojas de té hacia el centro de la taza.

MIKE BECKERS, *SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT*

Rotación diferencial

El efecto de la inercia puede también constatarse en la taza. Al remover el té, le conferimos un movimiento de rotación. Y debido al rozamiento interno del líquido, también se ven arrastradas las regiones que no están en contacto con la cucharilla. De acuerdo con el principio de inercia, cada una de las porciones del líquido continuaría desplazándose en línea recta y a velocidad constante si la pared de la taza no se interpusiera en su camino. Esto mismo es aplicable no solo a las porciones exteriores cercanas al borde, sino también a las más internas. Simplificando un tanto la situación, podemos imaginar que, al principio, todas ellas describen trayectorias concéntricas con idéntica velocidad angular.

Sin embargo, el intenso rozamiento reduce la velocidad en el borde de la taza, lo cual también afecta a las regiones más centrales a causa de la fricción interna. Por su parte, las capas inferiores del líquido se ven frenadas de manera adicional por la base del recipiente, de modo que quedan rezagadas con respecto a las que se encuentran más arriba. Debido a estos efectos, las regiones más interiores se ven empujadas hacia fuera, puesto que poseen mayor velocidad angular. Como resultado, el líquido tiende a agolparse en el borde de la taza formando una superficie parabólica que se eleva desde el centro hasta las paredes del recipiente. Esto es algo que todos hemos experimentado: si removemos enérgicamente una taza bien llena, el líquido se derramará por los bordes.

Dicha elevación lateral genera una presión hidrostática cada vez mayor, lo que da lugar a una fuerza dirigida hacia el fondo que desvía las partículas en rotación y las hace descender en espiral. Al acercarse al fondo, las partículas experimentan, por un lado, una desaceleración causada por el rozamiento (lo cual hace que se sitúen en el centro) y, por otro, una deriva hacia arriba para reemplazar a aquellas porciones que se desplazan desde la parte central hacia el borde. Por consiguiente, en el medio de la taza, el líquido se mueve en trayectorias espirales de abajo a arriba, desde donde es empujado hasta el borde para entrar después en una espiral descendente (*véase la ilustración adjunta*). Tras dejar de remover, la fricción disipa paulatinamente la energía cinética y va frenando este proceso hasta que el té queda en reposo.

Del té al plasma sanguíneo

Las hojas arremolinadas no permanecen ajenas al complejo movimiento del líquido. Debido a su mayor densidad, se posarían en el fondo. Sin embargo, el líquido en movimiento las arrastra consigo. Esto ocurre sobre todo cerca de la base de la taza, donde las hojas quedan atrapadas en la corriente de té que fluye desde los bordes hacia el interior. No obstante, no toman parte en el movimiento espiral ascendente que tiene lugar en el centro del recipiente, puesto que para ello tendrían que superar la fuerza de la gravedad, algo para lo que el rozamiento con el agua circulante no basta. Como mucho, veremos que las hojas dan algún que otro saltito estéril justo después de remover. Pero, al ralentizarse el movimiento del té, acabarán depositándose en un pequeño montón.

Einstein explicó este fenómeno tridimensional superponiendo a una corriente principal (la rotación en trayectorias concéntricas) otra secundaria en planos perpendiculares a ella. Pero la realidad es más compleja, ya que estos flujos ficticios no se corresponden con las verdaderas trayectorias de las porciones del líquido.

El mismo proceso puede observarse en otros ámbitos. Por ejemplo, en los tanques que recogen el agua de la lluvia, los granos de arena y otras partículas se acumulan siempre en el centro si el agua fluye hacia ellos de manera oblicua. En los últimos años, este efecto ha inspirado incluso un novedoso método para separar los glóbulos rojos del plasma sanguíneo. IyC

PARA SABER MÁS

Die Ursache der Mäanderbildung der Flußläufe und des sogenannten Baerschen Gesetzes. Albert Einstein en *Die Naturwissenschaften*, vol. 14, págs. 223-224, marzo de 1926. Traducción disponible en ***The cause of the formation of meanders in the courses of rivers and of the so-called Baer's law***; Albert Einstein en *Resonance*, vol. 5, n.º 3, págs. 105-108, marzo de 2000.

Label-free extraction of extracellular vesicles using centrifugal microfluidics. Joo Chuan Yeo et al. en *Biomicrofluidics*, vol. 12, art. 024103, marzo de 2018.

EN NUESTRO ARCHIVO

Maravillas de la física que pueden hallarse en una taza de café o de té. Jearl Walker en *IyC*, enero de 1978.

Café turco centrifugado. Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik en *IyC*, agosto de 2009.

José Manuel Sánchez Ron es miembro de la Real Academia Española y catedrático de historia de la ciencia en el Departamento de Física Teórica de la Universidad Autónoma de Madrid.



HISTORIA DE LA CIENCIA

Laplace, la Revolución y Napoleón

Ciencia y política en tiempos difíciles

José Manuel Sánchez Ron

Pierre Simon de Laplace (1749-1827), o conde De Laplace, posteriormente primer marqués De Laplace, fue uno de los grandes científicos de la Ilustración e inicios del siglo xix. Sus contribuciones a la ciencia más notables las realizó en los campos de la mecánica celeste y la teoría de las probabilidades, pero también fueron numerosas sus aportaciones a apartados de la física y la matemática. En su monumental *Traité de mécanique céleste* (1799-1825), formado por cinco tomos, desarrolló y consolidó la mecánica que Isaac Newton había presentado en *Philosophiae naturalis principia mathematica* (1687), así como el análisis matemático.

Fundamentales como fueron las aportaciones de Laplace a la ciencia, su biografía también sirve para ilustrar los complicados tiempos en que vivió y que pudo superar con notable éxito (recibió algunos de los mejores honores que Francia podía otorgar a un pensador: miembro de la Academia Real de Ciencias desde 1773 y de la Academia Francesa, donde ocupó en 1816 el sillón 8, que había pertenecido entre 1743 y 1759 a otro científico eminente, Pierre Louis Moreau de Maupertuis).

Laplace en los tiempos de la Revolución

Entre los acontecimientos que no pueden faltar en ninguna historia universal, figura, destacada, la Revolución francesa. De ella sabemos muchas cosas, especialmente las de orden político y social. Pero ¿cómo afectó la época revolucionaria a la vida y el trabajo de los científicos franceses? En el caso de Laplace, su extensa correspondencia muestra que pudo continuar las investigaciones y seguir ocupando los puestos docentes que desempeñaba antes de 1789. La relación que había mantenido con Lavoisier, con quien había publicado en 1780 un importante trabajo sobre el calor en *Memoires de l'Académie des Sciences*, no le pasó factura. Aquella relación fue particularmente satisfactoria para Laplace, como revela una carta que este dirigió al gran químico el 7 de marzo de 1782; una carta, además, que muestra cuáles eran los verdaderos intereses científicos de Laplace, así como la relación que Lavoisier mantuvo con la física:

Permítame hacerle algunas observaciones sobre el compromiso que he tomado de realizar junto a usted una serie de experimentos e investigaciones sobre la dilatación, el calor y la electricidad de los cuerpos. Empiezo por agradecerle esta asociación, que no puede más que adular mi amor propio, y que es muy ventajosa desde todos los puntos de vista para mi reputación […] Puedo asegurarle que si alguna cosa puede dirigirme hacia la física, eso será el trabajar junto a usted. Pero debo advertirle que mi gusto me dirige hacia la geometría, y que este gusto, junto a una pereza que me es natural, me deja demasiada poca libertad de espíritu para ocuparme de otras cosas.

Hasta ahora he cultivado la física para mi distracción y sin pretensiones. He leído muy pocas obras sobre esta ciencia, y lo poco que sé de ella lo he recogido principalmente de sus conversaciones y de las de algunos otros excelentes físicos. Pero para escribir sobre estos temas, me sería necesario estudiar y compulsar todas las obras de física y de química, que han aparecido en gran



WIKIMEDIA COMMONS/DOMINIO PÚBLICO

PIERRE SIMON DE LAPLACE. Retrato póstumo debido a Madame Feytaud (1842).

número, sobre todo en los últimos tiempos, y usted sabe que no siempre se han escrito con toda la concisión que se podría desear, y a menudo se encuentran pocas verdades en esos gruesos volúmenes. Así que no me siento ni con el coraje ni con la voluntad para emprender una lectura tan prodigiosa que, por otra parte, me distraería de mis trabajos geométricos y de algunas obras que desearía publicar sobre el análisis.

El deseo de vivir en otra situación política, más pacífica, que Laplace sentía ante lo que estaba sucediendo en Francia se trasluce por cartas como la que dirigió el 15 de julio de 1970 al geólogo y meteorólogo suizo Jean-André Deluc (1727-1817), que era miembro correspondiente de la Academia de Ciencias, y en la que incluía detalles científicos interesantes:

En Francia, todos los espíritus, todos los pensamientos se dirigen actualmente a los asuntos públicos. Veo con dolor que las ciencias sufren con esta distracción. No digo nada sobre los grandes cambios que se operan en nuestra constitución; tenemos una gran experiencia y el futuro nos dirá si nuestros legisladores han estado acertados. Sea lo que sea, le felicito por vivir bajo un Gobierno que ha adquirido desde hace tiempo una gran consistencia, y que me parece ser una de las bellas combinaciones del espíritu humano. Fue aproximadamente en la misma época, hacia finales del último siglo, cuando los ingleses establecieron los verdaderos fundamentos del sistema del mundo y del sistema social. Nosotros hemos combatido el primer sistema en Francia y hemos terminado por aceptarlo. Acaso ocurrirá también lo mismo con su sistema social.

Se refería a la mecánica y teoría de la gravitación universal que Newton había establecido en 1687 y que encontró una gran resistencia en Francia, donde dominaba la cosmología ideada por René Descartes, basada en la existencia de un *plenum* (vórtices), un universo en el que el vacío de las acciones a distancia newtonianas no tenía cabida. François Marie Arouet de Voltaire, que había vivido en Inglaterra, exiliado de Francia por motivos políticos entre 1725 y 1728, resumió la situación en sus *Lettres philosophiques, ou Lettres anglaises* (1734), en cuya «Carta decimocuarta: sobre Descartes y Newton», escribió: «Un francés que llega a Londres encuentra las cosas muy cambiadas tanto en filosofía como en todo lo demás. Ha dejado el mundo lleno [referencia al *plenum* cartesiano]; aquí lo encuentra vacío [las acciones a distancia]. En París se considera el universo compuesto de materia sutil [la que nutría los vórtices de Descartes]; en Londres no hay nada de esto». De hecho, la primera traducción de los *Principia* al francés, que realizó la marquesa de Châtelet, no se publicó hasta 1759.

El primer francés que tuvo el coraje de declararse abiertamente newtoniano fue Maupertuis (1698-1759). Lo hizo con la publicación en 1732 del *Discours sur les différentes figures des astres avec une exposition des systèmes de MM. Descartes et Newton*. Decimos «coraje» porque, aunque las ideas cartesianas iban agonizando, en Francia había que tener cuidado al criticarlas. Documentos preciosos en este sentido son dos cartas que Maupertuis envió a Johann Bernoulli en 1731. En la primera (18 de mayo), y después de criticar una teoría vorticial publicada en 1707 por Philippe Villemot, escribía:

Entre nosotros, [mis colegas franceses] se consideran a sí mismos más conocedores sobre esto de lo que realmente son, y en general creen que todo lo que se necesita para resolver cualquier problema es imaginar más vórtices.

Maupertuis se daba cuenta de que cualquier trabajo que defendiese las fuerzas a distancia newtonianas a través de un vacío irritaría a algunos de sus colegas más veteranos, especialmente si se presentaba en términos matemáticos avanzados. Preocupado por no perjudicar sus posibilidades de ser admitido en la Academia como pensionado (lo consiguió en julio de aquel mismo año), o simplemente buscando un lugar más receptivo, decidió enviar un trabajo claramente newtoniano a la Real Sociedad londinense (apareció en 1732 en *Philosophical Transactions*). El 11 de julio escribía al respecto a Bernoulli: «La doctrina en la que me baso aquí es algo odiosa en este país, en el que pensé al principio darla a conocer». Había preparado una «justificación [*apologie*]» para la audiencia parisina, pero decidió suprimirla. «No tuve el coraje de presentarla en un país en el que parece que no piensan de manera suficientemente profunda y donde no hacen justicia al sistema del Sr. Newton.»

Bernoulli no objetó la decisión de su colega, aunque le mostró su preocupación en una carta del 26 de junio:

No sé si agradará, de hecho, más a sus compatriotas publicando su trabajo sobre la atracción en Inglaterra que si lo hubiese publicado en París, ya que ¿no teme ser considerado un desertor, al ir a defender a otra parte una opinión que se tiene en su patria como física herética?

Animado por la favorable opinión de Bernoulli y ya pensionado de la Academia, Maupertuis decidió presentar a sus compatriotas sus ideas favorables a Newton. Tal fue el origen del citado discurso de 1732.

De todas maneras, lo que convenció de que el sistema de Newton era mejor que el de Descartes fueron las sucesivas aplicaciones de la teoría newtoniana que científicos como Maupertuis y Alexis-Claude Clairaut (1713-1765) realizaron en las décadas de 1740 y 1750 a problemas del tipo de cuál era la verdadera figura de la Tierra, el retorno del cometa Halley (previsto por Clairaut en 1758), el movimiento de la Luna y las trayectorias de las órbitas de Júpiter y Saturno.

Napoleón

La revolución que se inició el 14 de julio de 1789 fue un proceso muy complejo. La Convención (iniciada el 28 de julio de 1794 con la caída de Robespierre) se disolvió a sí misma el 26 de octubre de 1795, cuando entró en vigor una nueva constitución. A partir de entonces, Francia fue gobernada por un Directorio de cinco miembros, que se mantuvo hasta noviembre de 1799, cuando lo abolió el golpe de Estado del 18 de brumario (9 de noviembre) que instauró el Consulado. Una de las personas que resultó clave en este proceso fue Napoleón Bonaparte (1769-1821). En marzo de 1796 se produjo un momento decisivo en su carrera militar y política: fue nombrado comandante del Ejército francés en Italia, al mando de 50.000 hombres. Allí, sus victorias se sucedieron con rapidez. Derrotados los austríacos, firmado con sus representantes un tratado preliminar de paz en abril de 1796, y establecida la

República Cisalpina, Bonaparte regresó a París el 5 de diciembre de 1797, donde se encontró con la adulación, pero también con la sospecha, si no con el temor, hacia él por parte de los cinco miembros del Directorio. Dominada Italia, solo Gran Bretaña estaba en guerra con Francia, y el Directorio nombró a Napoleón comandante del Ejército para arrebatar Egipto a los ingleses.

Aunque la campaña de Egipto (en la que participaron numerosos científicos franceses) no fue tan exitosa como la de Italia, el regreso de Bonaparte a Francia fue triunfal y constituyó el primer paso hacia el poder absoluto que llegó a alcanzar. Consumado el mencionado golpe de Estado de 1799, unas pocas semanas después un referéndum aprobaba una nueva constitución que daba a Napoleón un poder casi ilimitado durante diez años. Fue nombrado uno de los tres cónsules, con autoridad para designar a los ministros y al Consejo de Estado, que él mismo presidía. En 1802 se convirtió en primer cónsul perpetuo, y en 1804, en emperador.

La mecánica de Newton encontró una gran resistencia en Francia, donde dominaba la cosmología ideada por René Descartes

Napoleón y Laplace

Napoleón es uno de los mejores ejemplos de gobernante que amó la ciencia. Representativas en este sentido son unas manifestaciones que consignó el naturalista Étienne Geoffroy Saint-Hilaire, quien formó parte de la expedición a Egipto que comandó el militar corso: «Aquí estoy», declaró el general, «conquistando Egipto como hizo Alejandro; sin embargo, me habría gustado más seguir los pasos de Newton. Este pensamiento me ocupó desde que tenía quince años».

No fue, está claro, un gran científico; ni siquiera un científico. Aun así, y debido a sus éxitos militares en la campaña de Italia, el 25 de diciembre de 1797 fue elegido miembro de la Sección de Mecánica de la Primera Clase del Instituto Nacional de Ciencias y Artes, sustituyendo al ingeniero y político Lazare-Nicolas-Marguerite Carnot, expulsado por el Directorio. El día siguiente, Napoleón aceptaba su elección con las siguientes hermosas palabras: «Las verdaderas conquistas, las únicas que no producen ningún pesar, son las que se realizan sobre la ignorancia. La ocupación más honorable al igual que la más útil para las naciones es la de contribuir a la difusión de las ideas humanas. El verdadero poder de la República francesa debe consistir en no permitir que exista una sola idea nueva que no le pertenezca».

La relación de Napoleón con Laplace databa de antes, de cuando en octubre de 1784 se incorporó como alumno a la Escuela Militar Superior de París, donde, por cierto, sobresalió en matemáticas. Laplace, que formaba parte del claustro de la Escuela, fue quien le evaluó en el examen final.

Una vez Napoleón en el poder, el ascenso de Laplace fue meteórico. Primero fue ministro del Interior, cargo para el que Bonaparte lo nombró el 9 de noviembre de 1799. Aquel puesto tenía facultades relacionadas con la ciencia; así, el 13 de noviembre, el matemático Gaspard Monge le escribía en su calidad de director de la Escuela Politécnica, el centro de enseñanza superior más prestigioso de Francia:

Ciudadano Ministro,

Tengo el honor de informarle de que el ciudadano Lagrange ha presentado su dimisión de instructor. Su mala salud parece ser el único motivo que le ha llevado a esta marcha, dolorosa bajo todos los puntos de vista para el Consejo de la Escuela.

El Consejo cree que tiene que proponerle, siguiendo los deseos del ciudadano Lagrange, que realice una designación para una 3.ª plaza de instructor de análisis, cuyas funciones son regulares y diarias. El ciudadano [Sylvestre-François] Lacroix, miembro del Instituto, ha reunido la unanimidad de votos en la sesión del Consejo de la Escuela, de la que le pasaré el acta.

En nombre de todos los miembros del Consejo y en el mío, le invito, ciudadano Ministro, a que confirme el nombramiento del ciudadano Lacroix por la Comisión Consular.

El Consejo desea que el nombramiento que ha hecho esté de acuerdo con sus opiniones y el interés que usted tiene por el éxito de la Escuela Politécnica.

Lacroix fue elegido, y Laplace se lo comunicaba el 18 de noviembre, expresándole sus deseos de que «este nombramiento, en el que ha reunido los votos del Consejo de la Escuela y los de los Cónsules de la República, os parezca digna recompensa a sus talentos y los servicios que ha prestado constantemente a la instrucción pública».

Sin embargo, el 24 de diciembre, Napoleón informaba a su antiguo profesor de que dejaba de ser ministro:

Los servicios para los que está llamado a servir a la República, ciudadano, en las eminentes funciones que le son conferidas, disminuyen mi pesar al verle alejado de un ministerio para el que concilió todos los votos. Tengo el honor de informarle de que he escogido al ciudadano Lucien Bonaparte como su sucesor.

Aquel cese no significó que perdiese importancia. Después de ministro, Laplace fue miembro del Senado y canciller de esta institución a partir de 1802. Y en 1808 dio un nuevo salto, accediendo a la nobleza imperial como conde del imperio; además, recibió múltiples honores que hicieron de él un hombre muy influyente en la «nueva Francia». Y continuó relacionándose con Napoleón.

Para finalizar recordaré una anécdota famosa. Parece ser que Napoleón preguntó a Laplace el motivo por el que en su gran *Traité de mécanique céleste* no aparecía la noción de Dios. «Sire, es una hipótesis de la que no tengo necesidad», dicen que le contestó. No creo que a Bonaparte le molestase la opinión de Laplace. Es posible, incluso, que comprendiese bien que un científico pensase de tal forma. Llegaría, no obstante, el momento en

que Bonaparte no mostraría la misma comprensión. Si tenemos en cuenta que los primeros tomos del *Traité de mécanique céleste* aparecieron en 1799, es de suponer que la pregunta de Napoleón y la respuesta de Laplace se produjeron por entonces. Pero las responsabilidades políticas de Bonaparte no hicieron sino crecer, culminando en 1804 cuando fue proclamado emperador. Y desde las alturas que proporciona un trono, no se contemplan necesariamente con la misma benevolencia las manifestaciones de un científico que pueden ser interpretadas como defensa del ateísmo. El ya emperador vio que algunos científicos no se recataban en este punto, entre ellos uno de sus enemigos, Joseph Jérôme Lalande, profesor del Colegio de Francia desde 1760 y autor de un voluminoso *Traité d'astronomie* que constituía la base obligada para los estudios de los futuros astrónomos. El político, el monarca, no podía permitir tal comportamiento. La ciencia era una cosa; pero la política, otra muy diferente, un territorio en el que no convenía molestar a quienes profesaban confesiones religiosas. Y el 13 de diciembre de 1805, Napoleón escribía a su ministro del Interior, Champagny:

Es con un sentimiento de dolor que me entero de que un miembro del Instituto, célebre por sus conocimientos, pero que ha vuelto hoy a la infancia, no tiene la suficiente sabiduría para callarse y busca que se hable de él, tanto por manifestaciones indignas de su antigua reputación y del cuerpo al que pertenece como por profesar el ateísmo, principio destructor de toda organización social, que quita al hombre todos sus consuelos y todas sus esperanzas. Mi intención es que llame usted al Presidente y al Secretario del Instituto, para que se encargue de hacer saber a este ilustre cuerpo, del que tengo honor de formar parte, que debe ordenar a Lalande [...] que no publique nada más, y no oscurezca en sus años postreros lo que hizo en sus días de más vigor para obtener la estima de los sabios; y si estas invitaciones fraternales no fuesen suficientes, me vería obligado a recordarle que mi primer deber es impedir que se envenene la moral de mi pueblo. Porque el ateísmo es destructor de toda moral, si no en los individuos, al menos en las naciones.

En la confrontación entre las necesidades políticas y los argumentos científicos, una de las manifestaciones de la relación entre poder y ciencia, venció en este caso —como en muchos otros— la política.

PARA SABER MÁS

Correspondance de Pierre Simon Laplace (1749-1827). Dirigido por Roger Hahn. 2 volúmenes. Brepols. Turnhout, 2013.

Correspóndance de Napoleón. Tomo XI. Plon-Dumaine. París, 1858-1869.

EN NUESTRO ARCHIVO

Ciencia en la campaña egipcia de Napoleón. Charles C. Gillispie en *IyC*, noviembre de 1994.

Las revoluciones de Lavoisier. José Manuel Sánchez Ron en *IyC*, junio de 2019.

por Bartolo Luque

Bartolo Luque es físico y profesor de matemáticas en la Universidad Politécnica de Madrid. Sus investigaciones se centran en la teoría de sistemas complejos.



Teclados numéricos

Ruptura de simetría y leyes de irreversibilidad en la evolución de la tecnología

Si compara la disposición del teclado numérico virtual de su teléfono móvil con el de la calculadora que lleva incorporada, se encontrará con una curiosa diferencia: el teclado para llamadas presenta la línea de teclas 123 arriba, mientras que el de la calculadora la sitúa abajo. Los teclados aparecen «invertidos», como podemos apreciar en la imagen inferior.

Eso mismo ocurre con las calculadoras electrónicas y los ya casi desaparecidos teléfonos digitales de teclas, que aparecieron prácticamente al mismo tiempo, a principios de los años sesenta del pasado siglo. Desde su nacimiento, los teléfonos presentaban la línea de teclas 123 arriba, y las calculadoras, abajo.

La hipótesis más extendida sobre el origen de esta divergencia cuenta que las calculadoras electrónicas heredaron la disposición de sus teclas de sus antecesores electromecánicos. Y que, cuando se hicieron los primeros tests de eficiencia con distintas configuraciones de teclas para teléfonos, se usó como sujetos de prueba a personal experto en teclear datos numéricos en calculadoras. Como las centralitas de teléfono de la época eran electromecánicas, la pericia de estos usuarios marcando en los teléfonos con teclado de tipo calculadora hacía que los pulsos fueran demasiado rápidos. Así que los ingenieros decidieron invertir las filas para que el marcaje de los usuarios fuera más lento y evitar así bloqueos en las centralitas. Esa disposición quedó congelada en el tiempo hasta nuestros días. Bonita historia, pero ¿es cierta?

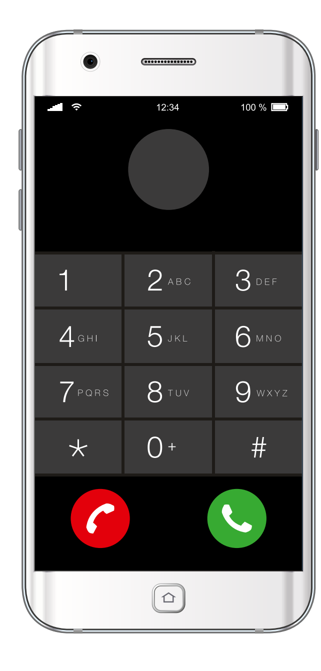
Accidentes congelados

Antes de responder a la pregunta anterior, dejen que les cuente otra bonita historia. Los dos ostensibles cohetes laterales de la ya jubilada lanzadera espacial de NASA se fabricaban en la empresa Thiokol, sita en Utah. Se transportaban en tren desde la propia fábrica hasta Cabo Cañaveral, donde se acoplaban a la nave.

Los ingenieros hubieran preferido que los cohetes fueran más anchos, pero entonces su traslado habría sido imposible debido al tamaño de los túneles que atravesaba el ferrocarril. La anchura de los túneles estaba determinada por la de las vías férreas, que todavía hoy es de 1435 milímetros. ¿Y por qué se ajusta a esa cifra el tamaño de las vías de EE.UU.?

Las primeras vías del país fueron construidas por los británicos, que previamente habían utilizado esa medida en sus propias líneas. Y los primeros raíles en Inglaterra habían sido instalados por constructores de carros, quienes utilizaron las mismas especificaciones que usaban para la distancia entre ruedas. A su vez, dicha longitud quedaba establecida por la existencia de una gran cantidad de viejos caminos empedrados con roderas para empotrar las ruedas. El Imperio romano construyó una nutrida red de carreteras para asegurar los desplazamientos rápidos de sus legiones y el comercio con las provincias, y la distancia entre roderas se estipuló en función del tamaño de las ancas de dos caballos. Así pues, y por sorprendente que pueda parecernos, el tamaño de los cohetes propulsores de la lanzadera de la NASA, un producto tecnológico de la era espacial, estuvo determinado por una medida establecida hace más de 2000 años por el trasero de dos caballos.

La historia anterior no es del todo cierta, pero como dicen los italianos, *se non è vero, è ben trovato*. Y ejemplifica magníficamente cómo una especificación histórica o un simple accidente del pasado puede repercutir de manera determinante en el presente. Lo cierto es que, en EE.UU. y en el resto del mundo, se construyeron inicialmente pequeños trazados férreos de muy variadas anchuras en función de las distintas prácticas existentes. La conexión entre vías homogeneizó grandes regiones. La estandarización ha dependido de la diversidad de anchos disponibles, así como de los beneficios y costos de la conversión al integrar trazados.





TECLADOS INVERTIDOS: El teclado virtual de los teléfonos móviles (*izquierda*) presenta la fila de números 123 en la parte superior. Sin embargo, el de las calculadoras exhibe la disposición opuesta (*derecha*). ¿A qué se debe esa diferencia?

El resultado ha sido variado: existen países, como Australia y Argentina, con tres anchos; otros, como la India y Japón, que tienen dos; y otros donde el ancho de las vías se «rompe» en la frontera, como ocurre entre Francia y España. Lo que parece patente según los historiadores es que existe un efecto de persistencia del fundador: hay una clara predominancia mundial del ancho propuesto inicialmente por George Stephenson en la primitiva vía de Liverpool a Manchester, que no en vano se conoce como «ancho estándar».

El ejemplo anterior no constituye una anécdota aislada. Volviendo a los teclados, la primera máquina de escribir mecánica, el modelo de Christopher Latham Sholes de 1868, tenía las teclas distribuidas alfabéticamente en dos filas. Pero las varillas, dispuestas en un semicírculo, se trababan a menudo cuando se pulsaban dos teclas correspondientes a varillas cercanas. Así que Sholes decidió determinar los pares de letras de uso más frecuente y separarlas lo máximo posible en el semicírculo de varillas. El resultado fue el teclado más extendido hoy en día: el QWERTY, denominado así por la disposición de las seis primeras letras de la fila superior.

Hoy en día, con nuestros teclados electrónicos, ninguna de las circunstancias que dieron éxito al teclado QWERTY tiene vigencia. El teclado Dvorak, propuesto por el psicólogo August Dvorak ya en 1932 y con una distribución de caracteres totalmente distinta, resulta mucho más eficiente: contribuye a que las manos se alternen haciendo la escritura menos cansada y más rápida. Sin embargo, y a pesar de los repetidos esfuerzos de la industria y los consejos de la ergonomía, ni este teclado ni otros han logrado desbancar al QWERTY. Los usuarios no están dispuestos a cambiar sus hábitos.

Probablemente por el parecido, esta historia bien documentada de accidente congelado sea la responsable de la hipótesis que comentábamos al principio sobre los teclados numéricos. Sin embargo, ha sido desmentida por varios empleados de la compañía Bell que participaron en el desarrollo del primer teléfono de teclas. En efecto, tras una serie de concienzudos experimentos con distintas variantes, el diseño del teclado numérico actual resultó ser el más ergonómico: era más rápido de marcar, producía menos errores y resultó el preferido por parte de los usuarios experimentales.

¿Y en el caso de las calculadoras? Los ingenieros de Bell se pusieron en contacto con algunos fabricantes de calculadoras para indagar por qué usaban justo la disposición inversa. Para su sorpresa, ninguno había perdido el tiempo en estudiar la disposición óptima de los números. Simplemente mantenían la alineación heredada con el 123 abajo por costumbre. Así que su diseño primigenio se mantuvo congelado y, en cierto modo, el puro azar fue el responsable de una diferencia que hoy día sigue patente hasta en los teclados virtuales.

Fluctuaciones y ruptura de simetría

Otro objeto cotidiano donde los números resultan fundamentales son los relojes. ¿Se ha preguntado alguna vez por qué las manecillas giran en el sentido que llamamos «horario»? Sin duda, cumplirían su misión igualmente bien si avanzaran en sentido contrario. De hecho, en sus inicios medievales, los relojes existían en estas dos versiones, como bien atestiguan algunos emblemáticos relojes antiguos.

¿Cómo se alcanzó el consenso? En realidad, no tuvo por qué haberlo. Como muestran en estos casos los modelos matemáticos, una pequeña fluctuación por azar, una diminuta diferencia en el número de relojes de uno y otro tipo, puede amplificarse hasta desbancar al competidor. Este intersante fenómeno corresponde a lo que los físicos llaman «ruptura de simetría».

En ingeniería y economía no faltan ejemplos en los que el azar, la mera contingencia, ha sido determinante en el desarrollo histórico. E incluso la propia evolución biológica está llena de situaciones similares. Los seres vivos son productos de la evolución ciega. El ojo suele ponerse como ejemplo de la complejidad que es capaz de desarrollar la evolución. Sin embargo, cualquier ingeniero al que se le encomendara la construcción de un órgano de visión descartaría un diseño semejante.

En los mamíferos, el nervio óptico (que recoge las señales de la retina para llevarlas al cerebro) entra por detrás del globo ocular, incidiendo sobre la propia retina. En el punto de unión se genera un punto ciego, sin capacidad de visión. Además, las células fotorreceptoras que conforman la retina están dispuestas al revés de su posición óptima y apantalladas por una capa de células nerviosas. No se trata de una buena solución, sino del resultado de diversos accidentes históricos que han quedado congelados.

Los organismos no se han construido de manera racional y sobre plano. Antes bien, son fruto de un proceso histórico contingente en el que las soluciones parciales en un momento determinado han acabado convertidas más tarde en hándicaps sin posibilidad de enmienda. De hecho, esta irreversibilidad del proceso evolutivo tiene nombre propio: ley de Dollo, y conocemos múltiples ejemplos de ella en nuestra tecnología.



IRREVERSIBILIDAD TECNOLÓGICA: En biología evolutiva, la ley de Dollo, debida al paleontólogo belga del siglo XIX Louis Dollo, afirma que los organismos nunca regresan a un estado evolutivo anterior. La historia de la tecnología permite documentar una tendencia similar. Por ejemplo, ¿regresarán los discos de los antiguos teléfonos? No lo creemos. En ellos, los números se marcaban haciendo girar una rueda en sentido horario hasta llegar a un tope. Al retroceder a su posición original, el disco mandaba pulsos a la centralita abriendo y cerrando la línea tantas veces como indicase el dígito marcado: el 1 enviaba un pulso, el 2 mandaba dos, etcétera (el 0 se hallaba en el extremo a fin de que su recorrido, más largo, enviase diez pulsos). Hoy, la tecnología digital ha tornado obsoleto —e innecesario— dicho sistema de marcación.

GETTY IMAGES/AQUATARKUS/ISTOCK

EVOLUCIÓN TIFLOTECNOLÓGICA

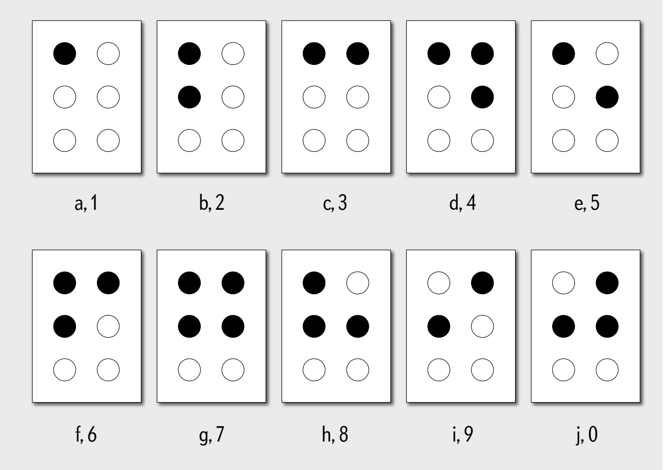
¿Se había dado cuenta de que, en muchos teclados numéricos, la tecla del 5 presenta una línea en relieve? Dicha marca se aprecia al tacto y sirve como referencia para localizar el resto de teclas sin necesidad de mirarlas. En los teclados QWERTY de los ordenadores, las letras F y J exhiben relieves semejantes. En mecanografía se aconseja, para alcanzar un gran número de pulsaciones por minuto sin mirar el teclado, que el dedo índice de la mano izquierda se sitúe sobre la F y el de la mano derecha sobre la J. De este modo, el meñique izquierdo queda sobre la A y el derecho sobre la Ñ (en los teclados españoles). Algo semejante ocurre con la tecla del 5: al detectarla al tacto, podemos determinar, inmediatamente y sin necesidad de mirar, la posición del resto de los números. Al mismo tiempo, este recurso proporciona un ejemplo de accesibilidad para personas con ceguera. Se trata de un caso sencillo de tiflotecnología.



Teclado numérico con marca de relieve en la tecla del 5.

La RAE define *tiflotecnología* como el «estudio de la adaptación de procedimientos y técnicas para su utilización por los ciegos». Otros ejemplos más elaborados los hallamos en los lectores de pantalla de ordenador basados en sintetizadores de voz, los reconocedores de texto impreso (también conocidos como OCR, por sus siglas en inglés) o los teclados e impresoras en braille para el ordenador. Este sistema de lectura y escritura táctil para personas ciegas fue desarrollado por el francés Louis Braille a mediados del siglo XIX. No constituye un idioma, sino un alfabeto con el que pueden representarse no solo letras y signos de puntuación, sino también números y símbolos matemáticos.

Habrá observado que las teclas numéricas de algunos cajeros automáticos y ascensores exhiben puntos en relieve. Estos no son otra cosa que la representación en braille de los guarismos. En su forma más extendida, cada signo en braille corresponde a una celda de seis puntos organizados en una matriz de tres filas por dos columnas. La imagen que reproducimos aquí expone la equivalencia para los números, donde un punto negro indica un altorrelieve, y uno blanco, su ausencia. Observe que cada disposición equivale tanto a un número como a una letra. Además, el braille ofrece la posibilidad de plasmar expresiones matemáticas de cualquier complejidad, y su estandarización se conoce como Código Matemático Unificado.



Marcas en braille para los dígitos del 0 al 9 y las primeras letras del alfabeto.

Los más viejos del lugar recordarán el sistema operativo MS-DOS, el precursor de Windows. En las primeras versiones de Windows se arrastraban una serie de problemas para manejar la memoria del ordenador, los cuales no eran sino resultado de su herencia. En cierto modo, el sistema operativo MS-DOS permanecía como «capa oculta» de Windows. En cierto momento, la inoperancia de las sucesivas versiones llegó a tales niveles de surrealismo que finalmente hubo que rediseñar Windows por completo para hacerlo operativo.

Estirando el símil biológico, si observamos la disposición de las teclas numéricas en teléfonos móviles, cajeros automáticos, cajas registradoras, teclados de ordenadores, datáfonos, mandos a distancia, reproductores de música, etcétera, podremos clasificarlos como de tipo teléfono o tipo calculadora y seremos capaces de establecer una rudimentaria filogenia. Los teléfonos móviles heredaron su distribución de teclas numéricas del teléfono fijo, cuyos dígitos fueron heredados a su vez de los teléfonos con disco giratorio. Lo mismo ocurre con la mayor parte de los datáfonos, mandos a distancia y reproductores de música. Por su parte, los teclados de ordenador y las cajas registradoras heredaron la disposición de sus teclas de las calculadoras, en cuyo linaje la contingencia histórica ha tenido más peso que el diseño racional.

Llevo varios días fijándome en los cajeros automáticos y he observado que aparecen ambas distribuciones. Parece que existe competencia entre los dos filos por este nicho ecológico. ¿Seguirán coexistiendo en el futuro ambos linajes? ¿Se decantará el mercado por una ruptura de simetría, como en el caso de los relojes? ¿O tal vez desaparecerán los cajeros antes de que eso ocurra?

PARA SABER MÁS

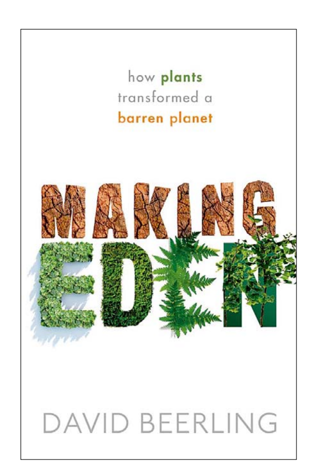
El mundo es un pañuelo: Un paseo pluridisciplinar por la ciencia. Bartolo Luque. Publicacions Universitat de València, 2009.

Evolución y complejidad. Jordi Bascompte y Bartolo Luque. Publicacions Universitat de València, 2012.

EN NUESTRO ARCHIVO

Historia paralela del teléfono. David A. Hounshell en *IyC*, marzo de 1981.

GETTY IMAGES/BIZHAN33/ISTOCK (*teclado*)



MAKING EDEN
HOW PLANTS TRANSFORMED A BARREN PLANET
David Beerling
Oxford University Press, 2019
272 págs.

La vida vegetal y el futuro de la humanidad

Historia de una singularidad evolutiva que cambió nuestro planeta para siempre

La botánica, fuente de terapia durante siglos, famosa *scientia amabilis* de antaño y considerada hoy cenicienta de la biología, apenas llega al público general, y si lo hace es siempre por noticias preocupantes, mal explicadas y relacionadas por lo común con la extinción de especies. Por ejemplo, se informa de que la vinca rosada (*Catharanthus roseus*), especie endémica de Madagascar, se halla en peligro de desaparecer, lo mismo que el 30 por ciento de todos los cactus del mundo. Pero en el primer caso se silencia que la planta condujo a tratamientos clave para la leucemia infantil, y en el segundo se omite que la tragedia se debe a coleccionistas sin escrúpulos. Cierto es que Madagascar, uno de los países emblemáticos de la biodiversidad, perdió entre 1950 y 2000 el 40 por ciento de sus bosques.

Making Eden es una guía inexcusable para comprender el mundo en que vivimos y el futuro que nos espera. David Beerling nos invita a imaginarnos la Tierra antes de convertirse en un planeta verde, como lo llamó Ramon Margalef en un libro clásico publicado por la editorial de esta revista. Cuando las plantas no habían colonizado aún la tierra firme, el planeta era un lugar desnudo con tonalidades amarillas, pardas y grises, azotado por un viento que erosionaba las rocas. ¿Cómo se produjo el tránsito de ese mundo inerte y desolador a una eclosión de praderas verdes y bosques feraces, muchos de los cuales cubren todavía algunas regiones privilegiadas de la Tierra?

Beerling, profesor de ciencias naturales y director del Centro Leverhulme para la Mitigación del Cambio Climático de la Universidad de Sheffield, explica con minucioso detalle cómo unas especies pioneras, pequeñas y sin formas foliares se asentaron a orillas de pozas o lagunas a partir de algas de agua dulce. Iniciaron, hace unos 500 millones de años, un camino que las llevaría hacia la adquisición de tallos leñosos y hojas, la creación de arbustos y el desarrollo de bosques y praderas. Ese salto al continente se hizo de una vez por todas: una singularidad evolutiva que cambió el mundo para siempre. En ese tránsito, los hongos simbiontes cumplieron una función transformadora. Las plantas no solo trocaron los colores de la Tierra, sino que alteraron también el clima y abrieron la puerta a la evolución de una amplia variedad de animales terrestres. Devinieron el sostén último de la biosfera y de todo lo que de ello se deriva. Sin plantas no existiríamos. Hoy, unos 7000 millones de personas dependemos de ellas para vivir y para conservar nuestra salud.

La aparición y espectacular diversificación de la vida vegetal en suelo firme reconfiguró el medio global y sentó las bases para todo lo que habría de seguir. Los continentes verdes de nuestros días son un legado evolutivo de acontecimientos originados en el alba de la vida. En vez de extraer energía de la química del agua del mar, como sus progenitores microbianos, las plantas aprovechan la energía solar que baña nuestro planeta. Dos tercios de esa radiación impacta en los océanos, donde promueve la fotosíntesis de las plantas marinas, en particular del fitoplancton. Con estas plantas microscópicas arranca la cadena trófica. El tercio restante irradia la superficie continental. Las hojas de bosques, praderas y cultivos captan esa energía solar para alimentar la fotosíntesis y sintetizar biomasa a partir de agua y dióxido de carbono.

Mediante la conversión de energía solar en energía química almacenada en los compuestos de carbono orgánicos, las plantas operan en la naturaleza como unos transductores de energía maravillosos. Los herbívoros comen plantas y los carnívoros se alimentan de herbívoros. Cada grupo de animales extrae beneficios a medida que convierte inexorablemente las plantas en tejido animal. Por último, hongos y bacterias, protagonistas de la desintegración, emplean un repertorio inagotable de estrategias metabólicas de degradación para recabar las últimas migajas de esa energía.

Los estomas constituyeron uno de los factores responsables del éxito de las plantas en el medio continental. Esas bocas sutiles aparecen en el registro fósil millones de años antes que las raíces y las hojas. Exquisitamente adaptados al medio, los estomas adornaron los delicados renuevos de las primeras plantas continentales. Posibilitaron que las plantas controlaran la pérdida de agua que se evaporaba de células y tejidos, mientras que el dióxido de carbono procedía en sentido inverso para promover la fotosíntesis. Su advenimiento señaló el comienzo de un modo nuevo y radical de vida vegetal basado en la explotación del agua y los nutrientes obtenidos del suelo, lo que posibilitó el acceso a lugares nunca antes alcanzados. A través de cientos de millones de años, las plantas se han apoyado en los estomas empaquetados en sus hojas para respirar.

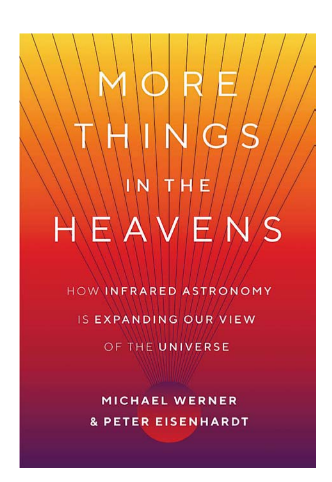
A diferencia de las plantas, motores verdes que transforman en materia orgánica la energía que necesita la vida para su desarrollo en tierra firme, ningún otro grupo de organismos agrega energía a la cadena alimentaria. Antes bien, todos la extraen. Los animales no pueden utilizar el dióxido de carbono de la atmósfera ni transformar la energía solar en energía química. Obtienen energía mediante la combustión de carbohidratos, los cuales las plantas fabricaron a partir de azúcares sintetizados durante la fotosíntesis. Sin plantas los herbívoros morirían de hambre, y sin estos desaparecerían los carnívoros. Sin ellas la cadena trófica se desplomaría y no quedaría nada para sustentar la vida en la Tierra. Ni mamíferos, ni primates, ni nosotros.

Las observaciones por satélite revelan que la productividad fotosintética del fitoplancton en los océanos, que sirve de alimento a los peces, viene a ser igual a la de las plantas en tierra firme. Pero esa productividad se está restringiendo y confinando a un tercio de la superficie del planeta. A

medida que nuestra actividad devastadora va recortando la biodiversidad vegetal, destruimos una riqueza que tardó millones de años en crearse. Con esa sobreexplotación corremos serio peligro de acabar con la existencia de la propia humanidad.

Por doquier, la biodiversidad vegetal está cayendo a velocidad alarmante y sin señales de freno. Plantas y animales vulnerables están desapareciendo de los inventarios de especies, una daga que amenaza al propio ser humano. Según previsiones de las Naciones Unidas, en la Tierra habrá más de 9000 millones de personas en 2050 y 12.000 millones en 2100. ¿Cómo conseguir alimento, agua y energía para tantos individuos? Todos los rincones, todos los medios, han sufrido y siguen sufriendo la presión de nuestra especie. Unos 5000 millones de hectáreas de la superficie continental se han convertido en suelo agrícola, se ha perdido el 30 por ciento de la selva amazónica y el 14 por ciento de las áreas silvestres en África. Al mismo tiempo, el 20 por ciento de las plantas vasculares de todo el mundo se encuentran en peligro de extinción. Por ahora, esa es la triste nota distintiva del nuevo tiempo en que nos encontramos, el Antropoceno, caracterizado por las profundas modificaciones que la humanidad ha ejercido en el planeta. ¿Será este también el tiempo de implosión de la humanidad, de su *big crash*?

—Luis Alonso



MORE THINGS IN THE HEAVENS
HOW INFRARED ASTRONOMY IS EXPANDING OUR VIEW OF THE UNIVERSE

Michael Werner y Peter Eisenhardt
Princeton University Press, 2019
304 págs.

El legado de la misión Spitzer

Una historia incompleta de la astronomía infrarroja

Al descubrir en 1800 la radiación infrarroja procedente del Sol, el gran astrónomo William Herschel proporcionó las primeras indicaciones de que el universo podía explorarse más allá de la luz visible. Se inauguraba así la era de la astronomía en múltiples longitudes de onda; es decir, la posibilidad de estudiar un mismo astro obteniendo información en diferentes dominios del espectro electromagnético.

El infrarrojo desempeña un papel clave en esos trabajos, pues permite acceder a regiones de las galaxias que de otro modo permanecerían ocultas. Por ejemplo, las pequeñas partículas de material sólido presentes en las nubes interestelares (los «granos de polvo») forman una pantalla que impide el paso de la luz visible pero que, en cambio, es transparente a la radiación de longitud de onda mayor, como la infrarroja. Más aún, el polvo interestelar emite su propia radiación en el infrarrojo, cuya detección hace posible diagnosticar la densidad y la temperatura del medio emisor. Por todo ello, la astronomía infrarroja se ha convertido en una herramienta fundamental para investigar los procesos de formación de estrellas, un fenómeno que se desarrolla en las regiones polvorientas de las nubes interestelares [*véase* «Formación estelar», por Erick T. Young; Investigación y Ciencia, abril de 2010]. El infrarrojo reviste además utilidad en prácticamente todos los campos de la astrofísica moderna, desde los estudios del sistema solar hasta los de las galaxias más lejanas.

Todo ello se describe de manera muy detallada en *More things in the heavens*, de Michael Werner y Peter Eisenhardt, donde también se explica cómo la atmósfera terrestre apantalla las radiaciones infrarrojas de mayor longitud de onda (aquellas de más de unas 5 micras), lo que obliga a instalar esta clase de telescopios en el espacio. Los autores han dedicado treinta años de su vida a colaborar en el diseño, construcción y explotación científica del telescopio espacial Spitzer. Este pequeño instrumento de la NASA, dotado con un espejo de 80 centímetros de diámetro, iba provisto de buenos equipos de detección (cámara, espectrógrafo y fotómetro multibanda), gracias a lo cual ha podido servir como observatorio de propósito general.

Apoyándose en numerosos ejemplos de observaciones realizadas por el Spitzer, los autores recorren de manera muy amena pero rigurosa todas las grandes cuestiones de la astrofísica contemporánea: la formación de galaxias, el nacimiento de estrellas y planetas, el estudio de exoplanetas, la estructura de la Vía Láctea, las propiedades de los cuásares y los núcleos activos de galaxias, los modelos cosmológicos, etcétera. Todos los capítulos están magníficamente ilustrados con las imágenes y espectros obtenidos por el Spitzer, y las leyendas de las figuras son muy detalladas, lo que permite al lector apresurado recorrer el libro saltando de imagen en imagen. Especialmente espectaculares son las comparaciones entre las fotografías óptica e infrarroja de un mismo objeto (como una nebulosa o un cúmulo de galaxias), lo que deja patente la utilidad de la astronomía en múltiples longitudes de onda.

De las 300 páginas del libro, más de 80 están consagradas a apéndices, notas técnicas, bibliografía e índices: un material que abunda en detalles técnicos del telescopio Spitzer, sus modos de uso, la historia de su diseño y su construcción. Todo ello será de gran interés para el astrónomo que, habiendo utilizado este telescopio para algún proyecto, desee adquirir una visión general de la gestación de la misión y de sus resultados en los distintos campos de la astrofísica. Por su lado, el lector no especialista disfrutará más con la primera parte de la obra, dedicada a esa visión panorámica de la astronomía.

Lanzado en 2003, el Spitzer estuvo completamente operativo durante seis años. Algunas de sus observaciones constituyen un legado de valor incalculable, como los enormes mosaicos de cientos de miles de imágenes de la Vía Láctea, los cuales han proporcionado la visión infrarroja a gran escala más detallada de nuestra galaxia. Pasados esos seis años, sin embargo, el telescopio perdió el refrige-

rante y tuvo que comenzar a funcionar con limitaciones, lo que redujo su sensibilidad. Pero todavía sigue siendo útil, por lo que la NASA ha asegurado su operación hasta este año. No cabe ninguna duda de que ha sido un instrumento de gran éxito.

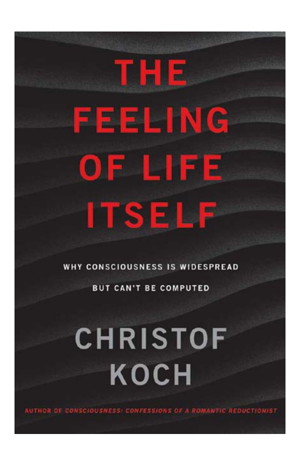
No obstante, el lector generalista que desee adquirir una visión amplia de la astronomía infrarroja debería ser informado de que el Spitzer no ha sido el único telescopio de este tipo de la historia, como casi parece desprenderse de la lectura del libro, en el que los autores olvidan dar los antecedentes. Apenas se mencionan las misiones del Satélite Astronómico Infrarrojo (IRAS, lanzado en 1983) y el Observatorio Espacial Infrarrojo (ISO, de 1995), ambas con una importante contribución europea y pioneras en el campo de la astronomía infrarroja espacial.

Pero, sobre todo, el libro tampoco menciona más que muy de pasada el gran telescopio espacial Herschel, de la Agencia Espacial Europea. Equipado con un espejo de 3,5 metros de diámetro (una superficie colectora 19 veces mayor que la del Spitzer), este instrumento fue lanzado al espacio el 14 de mayo de 2009. Coincidencias de la vida, el Spitzer agotaba su refrigerante al día siguiente, de forma que el Herschel tomó el relevo y abrió una nueva época de descubrimientos completamente ignorados en este libro [*véanse* «El observatorio infrarrojo Herschel», de Paolo Saraceno y Anna di Giorgio, *y* «El universo invisible de Herschel», de Paolo Saraceno; Investigación y Ciencia, febrero de 2013].

Es cierto que la obra está referida estrictamente a la historia y al legado del Spitzer. Pero eso no se refleja en el título ni en la portada, por lo que el lector poco advertido deberá informarse por su cuenta de que esta no es toda la historia de la astronomía infrarroja ni mucho menos. También se echa en falta una mención, que yo consideraría imprescindible, a otros resultados astronómicos recientes que completan y amplían los obtenidos en el infrarrojo. Pienso sobre todo en las investigaciones en ondas de radio, como las llevadas a cabo por el radiotelescopio gigante ALMA, en Chile, las cuales son de gran relevancia para muchas de las cuestiones tratadas en el libro.

En resumidas cuentas, *More things in the heavens* proporciona una descripción muy detallada de la misión Spitzer, cuyos resultados se aprovechan para ofrecer una visión general del universo. Este objetivo, que evidentemente era el de los autores, está plenamente logrado. El lector que sea consciente de que se trata de una visión parcial y restringida a este proyecto de la NASA considerará muy provechosa su lectura. Sin embargo, muchos no especialistas y consumidores habituales de divulgación científica quizás desearían tener una visión más completa de la astronomía infrarroja. Para ello deberán ir más allá e informarse sobre las misiones europeas que han liderado este campo durante décadas. Querrán conocer los resultados del Herschel y, por supuesto, sentirán curiosidad por las nuevas misiones que ya se están preparando para el futuro, algo que tampoco se aborda en el libro. Un ejemplo prominente de estos nuevos proyectos es el Telescopio Espacial Infrarrojo de Cosmología y Astrofísica (SPICA), fruto de la colaboración entre las agencias japonesa y europea, el cual supondrá un nuevo paso adelante en esta maravillosa rama de la astronomía si, como mucho esperamos, acaba lanzándose en 2032.

—Rafael Bachiller
Observatorio Astronómico Nacional



THE FEELING OF LIFE ITSELF
WHY CONSCIOUSNESS IS WIDESPREAD BUT CAN'T BE COMPUTED
Christof Koch
MIT Press, 2019
280 págs.

El sentimiento de estar vivo

La búsqueda científica del origen físico de la consciencia

Christof Koch, presidente y director científico del Instituto Allen de Ciencias del Cerebro, en Seattle, ha escrito una obra de síntesis sobre el fenómeno de la consciencia, su principal tema de investigación desde su colaboración inicial con Francis Crick en los años noventa del siglo pasado. Este libro se suma a otros y a numerosos artículos de investigación y divulgación sobre la materia. En todos ellos, Koch busca una solución al problema de desentrañar qué une la experiencia consciente del dolor, la alegría, el color o el olor con la actividad bioeléctrica del cerebro: cómo un estado físico engendra uno no físico, subjetivo. Para deshacer ese nudo gordiano, Koch propone una teoría cuantitativa que comienza con la experiencia consciente y que procede hacia el cerebro. Una teoría que, es la tesis de este libro, se basa en el concepto de información integrada [*véase* «La teoría de la información integrada»; por Christof Koch; Investigación y Ciencia, enero de 2018].

Antaño considerada predio de filósofos, la consciencia se convirtió en objeto de inquisición científica en manos de Crick, una pasión que le había ocupado antes incluso de dedicarse a descifrar el código genético y descubrir la estructura de doble hélice del ADN. Actores de ese cambio de paradigma fueron también Ned Block, David Chalmers, Stanislas Dehaene, Giulio Tononi, Wolf Singer y, por supuesto, el propio Koch. Para ello se apoyaron en métodos para detectar la actividad de neuronas individuales, en estudios clínicos y en técnicas de formación de imágenes que posibilitaron la investigación no invasiva del cerebro humano en acción.

El cerebro humano, un órgano de 1400 gramos, es una masa de tipo gelatinoso fácilmente deformable al tacto. Bajo ese aspecto anodino se esconde una extrema complejidad. Desde el punto de vista morfológico comprende una amplia diversidad de tipos celulares, generados en buena parte durante el desarrollo embrionario. Contiene del orden de 100.000 millones de neuronas y 10^{15} conexiones, o sinapsis. Cartografiar dichas conexiones no es fácil. Disponer de semejante mapa, conocido como conectoma, resulta indispensable para modelizar *in silico* las operaciones cerebrales.

que lleguemos a saberlo todo sobre ellos y que, aun así, sigamos sin entender por qué determinados procesos físicos generan experiencias conscientes y otros no.

El sueño de todo neurocientífico es obtener un conectoma a nanoescala del cerebro humano completo, una utopía aún muy lejana. Hasta ahora solo se ha obtenido el conectoma de dos especies: del nematodo *Caenorhabditis elegans*, en 1986, y de la larva de *Ciona intestinalis*, un urocordado, en 2016. En el conectoma cerebral se hallan los correlatos neurales de la consciencia; esto es, los aspectos de la función cerebral que se modifican cuando se producen determinados cambios en la consciencia.

Todos tenemos un conocimiento intuitivo de la consciencia. Es lo que se desvanece en el sueño sin ensoñación y se restaura cuando nos despertamos o soñamos. Es lo que somos y lo que tenemos. Si perdemos la consciencia, perdemos nuestra identidad y el mundo entero se nos disuelve en la nada. Ahora bien, neurólogos y psicólogos coinciden en que se trata de algo huidizo. Hay quienes esperan alcanzar una explicación, pero otros se muestran más pesimistas. Ante esta situación, lo más apropiado parece ser acopiar el mayor número posible de datos sobre los correlatos neurales de la consciencia. Aunque también es posible que lleguemos a saberlo todo sobre ellos y que, aun así, sigamos sin entender por qué determinados procesos físicos generan experiencias conscientes y otros no.

A la postre, la consciencia es un sentimiento de estar vivo. Muy extendida en el reino animal, no hay retazo alguno de ella en el mundo de la computación programable. Un robot puede detectar colores, sonidos o temperatura, pero la consciencia describe el sentimiento cualitativo que va asociado a tales percepciones junto con los procesos más profundos de reflexión, comunicación y pensamiento.

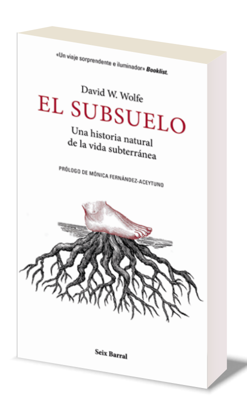
Las técnicas desarrolladas para medir la actividad cerebral han posibilitado la criba de teorías sobre la naturaleza de la consciencia, su constitución en el cerebro y los límites entre estar consciente e inconsciente. Al respecto puede mencionarse el caso de una joven de 23 años que en 2005 sufrió un accidente que la dejó en estado vegetativo sin capacidad de repuesta a los estímulos. Podía abrir los ojos y mostrar ciclos de sueño y vigilia, pero no respondía a las órdenes ni daba señales de movimientos voluntarios. Adrian Owen y sus colaboradores la examinaron con resonancia magnética funcional mientras le dictaban una serie de órdenes. Cuando le pidieron que imaginara participar en un partido de tenis, percibieron actividad en el área motora suplementaria del cerebro. Cuando le solicitaron que se imaginara deambulando por su casa, la actividad se avivaba en tres áreas cerebrales asociadas con el movimiento y la memoria. Los neurocientíficos registraron las mismas pautas en individuos sanos a quienes se les dictaron idénticas órdenes. El hallazgo de que las personas en coma mostraban signos de consciencia transformó la neurociencia.

De las múltiples teorías sobre la consciencia que se han avanzado en los últimos decenios, Koch ha contribuido al desarrollo de la teoría de la información integrada, esbozada originalmente por Giulio Tononi en 2004. Inspirada en el panpsiquisimo, la teoría asigna a cada estado cerebral individual una forma o espacio en el que emerge la experiencia subjetiva. Un postulado esencial es que la consciencia depende de un sustrato material, pero no es reductible a él ni tampoco privativa del ser humano.

—*Luis Alonso*

NOVEDADES

Una selección de los editores de *Investigación y Ciencia*



EL SUBSUELO
UNA HISTORIA NATURAL DE LA VIDA SUBTERRÁNEA
David W. Wolfe
Seix Barral, 2019
ISBN: 978-84-322-3560-3
352 págs. (20 €)

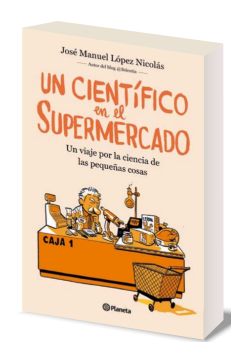
CENANDO CON DARWIN
TRAS LAS HUELLAS DE LA EVOLUCIÓN EN NUESTROS ALIMENTOS
Jonathan Silvertown
Crítica, 2019
ISBN: 978-84-9199-140-3
288 págs. (18,90 €)



SI ESCUECE, CURA
50 MALAS PRÁCTICAS DE SALUD AL DESCUBIERTO
Esther Samper
Cálamo, 2019
ISBN: 978-84-16742-16-5
412 págs. (22,90 €)



UN CIENTÍFICO EN EL SUPERMERCADO
UN VIAJE POR LA CIENCIA DE LAS PEQUEÑAS COSAS
José Manuel López Nicolás
Planeta, 2019
ISBN: 978-84-08-21725-1
320 págs. (17,90 €)



Recopilación de Daniel C. Schlenoff

MARZO

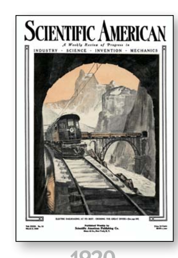
1970

El reflector láser lunar

«En julio del año pasado, los astronautas del Apolo 11 desplegaron en la superficie lunar una serie de reflectores de tipo prisma que ha posibilitado medir la distancia entre la Tierra y la Luna con una precisión de casi quince centímetros. La cantidad que importa no es, sin embargo, la distancia absoluta entre nuestro planeta y su satélite, sino las variaciones de esa distancia medidas durante un período de meses y años. Esas variaciones pueden estudiarse para resolver importantes cuestiones científicas, tales como el modo en que se distribuye la masa en el interior de la Luna, la velocidad de deriva de nuestros continentes al acercarse o alejarse entre sí, y los cambios de posición del polo norte terrestre (que se desplaza obedeciendo a fuerzas desconocidas). Una cuestión más esencial que cualquiera de las anteriores es si la constante de la gravitación es realmente constante, o si puede que disminuya lentamente con el paso del tiempo.»



1970



1920



1870

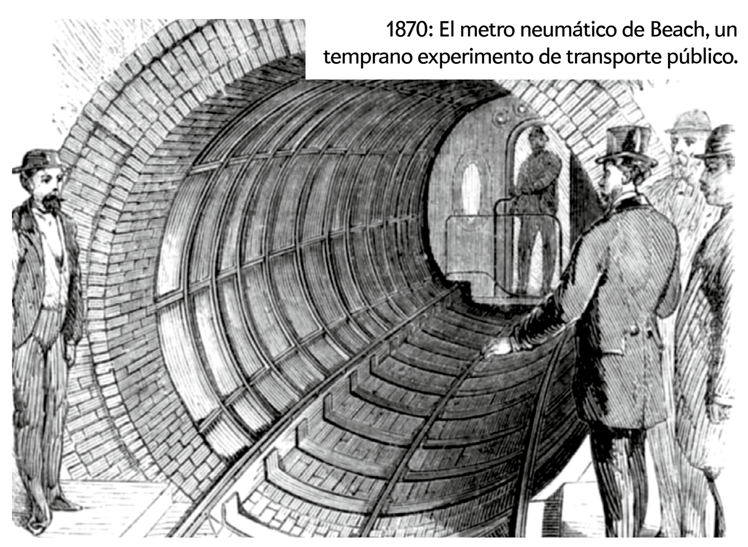
1920

Llamando a Marte

«Las recientes sugerencias de que los marcianos tratan de enviarnos señales podrían carecer de fundamento, pero al menos han llamado la atención del público sobre un aspecto importante. La idea de la comunicación con seres inteligentes de otro planeta es demasiado fascinante para que la imaginación humana se resista a ella. Para despertar en el público el grado de entusiasmo necesario, hay que garantizarle que un intercambio de señales desembocará presto en un intercambio de ideas sobre todos y cada uno de los temas de interés común. Con los marcianos queremos hablar de nuestras nociones científicas, sociales y religiosas, y si su civilización es mucho más antigua que la nuestra, deseamos aprender de ellos cosas que nos ayuden con nuestros propios problemas.»

Infraestructura para la aeronáutica

«Lo más importante de lo aprendido del vuelo de larga distancia de ida y vuelta sobre el continente americano, realizado el verano pasado por el Ejército, fue la auténtica necesidad de campos de aterrizaje adecuados; y conforme se dan a conocer los detalles más completos del reciente vuelo de 19.000 kilómetros de Inglaterra a Australia, aprendemos la misma lección, incluso reforzada. Si la aviación de larga distancia ha de lograr el éxito comercial, buena parte de los futuros presupuestos, públicos o privados, debe dedicarse al abastecimiento de unos aeródromos no improvisados, sino concienzudamente bien construidos y del todo equipados con las instalaciones necesarias para suministrar combustible, provisiones y otros artículos imprescindibles.»



1870: El metro neumático de Beach, un temprano experimento de transporte público.

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. XXII, N.º 10, 5 DE MARZO DE 1870

1870

Metro neumático

«Las puertas del Transporte Neumático Beach se abrieron al público por primera vez cuando se ofreció una “recepción bajo el suelo de Broadway” a las autoridades estatales y municipales y a miembros de la prensa. Estuvieron presentes todas las personalidades ciudadanas y del estado y la inspección de los trabajos les produjo la máxima satisfacción. Los diarios han informado largamente del evento, que ha causado sensación en la metrópolis. El *New York Herald* dice: “Fue virtualmente el día inaugural del primer ferrocarril subterráneo en América”.»

Este proyecto piloto fue diseñado y construido por Alfred Ely Beach, a la sazón editor de Scientific American.

Energía telúrica

«En general, ya se ha desechado la idea de que, en períodos remotos, unas “catástrofes” repentinas alzaron las cadenas montañosas o abrieron las cuencas oceánicas. Sir Charles Lyell ha conseguido que se acepte su doctrina de que los hechos geológicos hay que explicarlos mediante fuerzas que actúan hoy; de que la misma energía que ahora eleva la costa de Escandinavia a razón de unos centímetros por siglo y hunde la costa de New Jersey más o menos al mismo ritmo, si actúa durante suficiente tiempo, bastará para hacer continentes de todos los océanos y sumergir todos los continentes; y de que los terremotos y las erupciones que han formado algunas montañas e islas a lo largo de nuestras vidas solo necesitan tiempo para formar incontables más.»



NEUROCIENCIA

El mapa social del cerebro

Matthew Schafer y Daniela Schiller

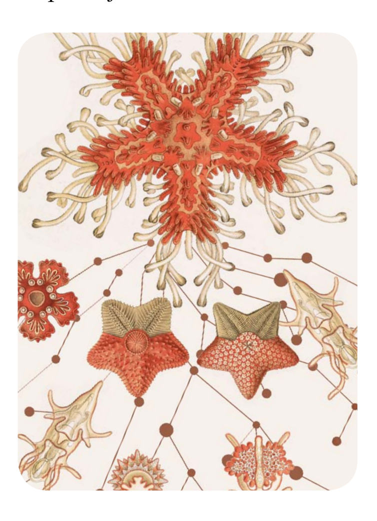
Los circuitos neuronales que rastrean nuestra localización en el espacio y el tiempo podrían determinar también la forma en que nos relacionamos con otras personas.

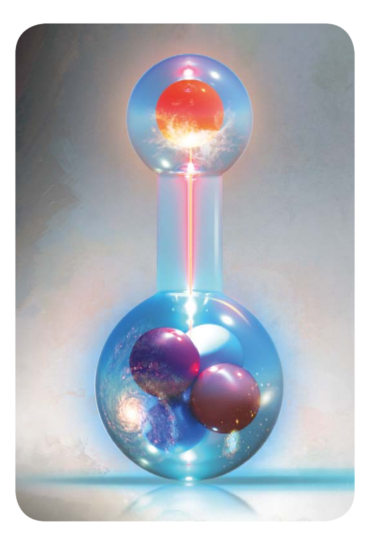
BIOLOGÍA EVOLUTIVA

Redes de genotipos: los senderos de la evolución

Susanna Manrubia y José A. Cuesta

¿Cómo navega la vida a través del océano casi infinito de posibilidades biológicas? La teoría de redes comienza a llenar el hueco que dejó la teoría de Darwin.





ASTROQUÍMICA

La primera molécula del universo

Ryan C. Fortenberry

Los científicos han identificado misteriosas moléculas espaciales y el compuesto que habría dado origen a la química del cosmos.

MATEMÁTICAS

La muchedumbre en ecuaciones

Bertrand Maury, Sylvain Faure

Físicos y matemáticos elaboran modelos muy logrados para describir la evacuación de un edificio o el tránsito de pasajeros en una estación.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas
EDICIONES
Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz
DIRECTOR DE MÁRQUETIN Y VENTAS
Antoni Jiménez Arnay
DESARROLLO DIGITAL
Marta Pulido Salgado
PRODUCCIÓN
M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA
Eva Rodríguez Veiga
ADMINISTRACIÓN
Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES
Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

ACTING EDITOR IN CHIEF Curtis Brainard
PRESIDENT Dean Sanderson
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek

DISTRIBUCIÓN

para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca - Trigo, 39 - Edificio B
28914 Leganés (Madrid)
Tel. 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD

Prensa Científica, S. A.
Teléfono 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

ATENCIÓN AL CLIENTE

Teléfono 935 952 368
contacto@investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	75,00 €	110,00 €
Dos años	140,00 €	210,00 €

Ejemplares sueltos: 6,90 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

Asesoramiento y traducción:

Andrés Martínez: *Apuntes*; Fabio Teixidó: *Apuntes, El peor escenario climático posible no es el más probable, Una solución a la paradoja de Fermi y La dinamo terrestre, un desafío centenario*; Claudi Mans: *Las imitaciones de la carne*; Anna Romero: *Nuevas pistas sobre el origen del bipedismo*; Miguel A. Vázquez Mozo: *El experimento de la triple rendija*; Pedro Pacheco: *¿Por qué necesita el cerebro que hagamos ejercicio?*; Sixto Castro Rodríguez: *El gran error de Galileo*; José Óscar Hernández Sendín: *La ciencia necesita mejores teorías*; M. Gonzalo Claros: *El poder terapéutico de las esferas de ADN y ¿Vuelve la fagoterapia para quedarse?*; Javier Grande: *Vórtices en la taza de té*; J. Vilardell: *Hace...*

ISSN edición impresa 0210-136X Dep. legal: B-38.999-76
ISSN edición electrónica 2385-5665

Imprime Rotimpres - Pla de l'Estany s/n - Pol. Ind. Casa Nova 17181 Aiguaviva (Girona)

Printed in Spain - Impreso en España